

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
VAGNER SILVERIO

COMPARAÇÃO NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DA
CORROSÃO ACELERADA PELO FLUXO (FAC) -
EM PH NEUTRO E BAIXA TEMPERATURA

CURITIBA
2019

VAGNER SILVERIO

COMPARAÇÃO NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DA
CORROSÃO ACELERADA POR FLUXO (FAC) -
EM PH NEUTRO E BAIXA TEMPERATURA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, na área de concentração de Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Prof. Dr. Julio César de Almeida

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S587c

Silverio, Vagner

Comparação numérica-experimental da corrosão acelerada por fluxo (FAC) - em PH neutro e baixa temperatura [recurso eletrônico] / Vagner Silverio. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

Orientador: Julio César de Almeida .

1. Corrosão. 2. Aço – Corrosão. 3. Corrosão Acelerada pelo Fluxo. I. Universidade Federal do Paraná. II. Almeida, Julio César de. III. Título.

CDD: 620.193

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

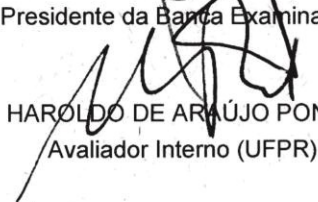
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **VAGNER SILVERIO**, intitulada: **COMPARAÇÃO NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DA CORROSÃO ACELERADA PELO FLUXO (FAC) - EM PH NEUTRO E BAIXA TEMPERATURA**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVADO** no rito de defesa.

A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 22 de Maio de 2019.



JULIO CÉZAR DE ALMEIDA
Presidente da Banca Examinadora



HAROLDO DE ARAÚJO PONTE
Avaliador Interno (UFPR)



PAULO CESAR BORGES
Avaliador Externo (UTFPR)

Este trabalho é dedicado
à minha família, aos amigos
e colegas, pelo incentivo
e apoio constantes.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente queria agradecer e expressar a minha imensa gratidão de maneira geral a todos que de alguma forma e momento contribuíram para a realização desta dissertação.

A algumas pessoas devo um agradecimento especial. Agradeço a minha família e amigos, pelo amor, carinho e apoio incondicional. Ao meu orientador Julio C. Almeida, grande professor e grande pessoa, pelo suporte, suas correções e incentivos.

Aos amigos e colegas do Lactec, pela amizade, carinho, companheirismo e pela colaboração, pois muitas das inspirações surgiram de conversas informais e que de alguma forma contribuíram no desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Lactec por ceder uso de diversos equipamentos e pela disponibilidade de seus laboratórios para a realização experimental, à Usina Termelétrica de Pernambuco (Termope) do grupo Neoenergia pela bolsa de mestrado e subsídios dos componentes/equipamentos comprados para a realização dos ensaios.

Por último, mas não menos importante agradeço a Deus, que me deu energia e força para concluir todo esse trabalho.

“We crave for new sensations but soon become indifferent to them. The wonders of yesterday are today common occurrences” (Nikola Tesla)

RESUMO

A Corrosão Acelerada pelo Fluxo (FAC) é uma forma de corrosão generalizada com maior suscetibilidade de ocorrer em tubulações de aço carbono ou de baixa liga que operam em altas temperaturas. Sendo de grande relevância para as plantas industriais e de geração de energia. Muitas vezes a realização de inspeções não é viável na maioria das plantas, por isso utilizam-se modelos para prever a taxa de FAC. Tem se registrado a ocorrência de FAC sob condições de operação incomuns e severas, em baixas temperaturas e pH neutro, com taxas de degradação superiores as previstas pelos modelos teóricos. Por isso foi realizado o projeto/construção de uma bancada geradora de FAC com o intuito de obter dados experimentais para a FAC em baixa temperatura e pH neutro. Comparando os dados experimentais com os dos modelos de predição de FAC, pode-se observar uma grande discrepância entre os valores. Isso se deve ao fato dos modelos serem concebidos para a condição da FAC em temperatura e pH elevados onde a maior influência é a difusão/dissolução dos íons de ferro, enquanto que em baixa temperatura e pH neutro a influência é a taxa transferência de massa. Além disso com a análise da corrosão pôde-se perceber a formação de uma fase que usualmente não é considerada/citada na literatura.

Palavras-chave: Corrosão Acelerada pelo Fluxo (FAC). FAC em baixa temperatura e pH neutro. Monitoração da FAC. Modelos de predição de FAC.

ABSTRACT

Flow Accelerated Corrosion (FAC) is a form of generalized corrosion with higher susceptibility to occur in low alloy or carbon steel pipes operating at high temperatures. Being of great relevance for industrial plants and power generation. Often performing inspections is not feasible in most plants, so we use models to predict FAC rate. The occurrence of FAC has been recorded under uncommon and severe operating conditions, at low temperatures and neutral pH, with degradation rates higher than those predicted by the theoretical models. Therefore, the design/construction of a FAC generator base was carried out in order to obtain experimental data for the FAC at low temperature and neutral pH. Comparing the experimental data with those of the FAC prediction models, a large discrepancy between the values can be observed. This is due to the fact that the models are designed for the FAC condition at high temperature and pH where the greatest influence is the diffusion / dissolution of the iron ions, while at low temperature and neutral pH the influence is the mass transfer coefficient. Moreover, with the analysis of the corrosion, it was possible to perceive the formation of a phase that is not usually considered / quoted in the literature.

Key-words: Flow Accelerated Corrosion (FAC). FAC at low temperature and neutral pH. FAC monitoring. Prediction models of FAC.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FALHA NO COTOVELO DO SISTEMA DE CONDENSAÇÃO DA PLANTA DE SURRY.....	26
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MECANISMO DE FAC NO AÇO	27
FIGURA 3 – ESQUEMA DO MECANISMO DE FAC	28
FIGURA 4 – FATORES QUE INFLUENCIAM A FAC	30
FIGURA 5 – FAC MONOFÁSICA.....	31
FIGURA 6 – FAC BIFÁSICA	31
FIGURA 7 – A INFLUÊNCIA CALCULADA DA TEMPERATURA.....	33
FIGURA 8 – TAXA DE FAC EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO	34
FIGURA 9 – EFEITO DO CROMO NA TAXA DE FAC RELATIVA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS	36
FIGURA 10 – EFEITO DE ELEMENTOS DE LIGA EM AÇOS NA FAC	37
FIGURA 11 – SOLUBILIDADE DOS ÍONS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO PH ..	38
FIGURA 12 – DIAGRAMA POTENCIAL-pH DO SISTEMA Fe-H ₂ O A 150 °C E A REGIÃO DE FAC	39
FIGURA 13 – TAXA DE FAC EM FUNÇÃO DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO	40
FIGURA 14 – VARIAÇÃO DO ORP E DA QUANTIDADE DE Fe	41
FIGURA 15 – TESTES PADRÕES PARA INVESTIGAR A FAC	42
FIGURA 16 – DEPENDÊNCIA DA TAXA DE FAC EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	43
FIGURA 17 – DIFERENÇA DE FASE DAS ONDAS.....	47
FIGURA 18 – FUNCIONAMENTO DA PONTEIRA E O PADRÃO DAS FRANJAS PRODUZIDO PELO LED EM UMA SUPERFÍCIE	47
FIGURA 19 – INSPEÇÃO POR ULTRASSOM	48
FIGURA 20 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO MODELO DE SANCHEZ-CALDERA	52
FIGURA 21 – VARIAÇÃO DA POROSIDADE COM A TEMPERATURA.....	55
FIGURA 22 – ESQUEMA DA BANCADA GERADORA DE FAC	57
FIGURA 23 – ERRO DEVIDO A CONDUÇÃO DE CALOR	61
FIGURA 24 – PROJETO DA BANCADA GERADORA DE FAC	62
FIGURA 25 – CONSTRUÇÃO DA BANCADA GERADORA DE FAC.....	63

FIGURA 26 – PAINEL ELÉTRICO	63
FIGURA 27 – TERMOPAR	65
FIGURA 28 – MEDIDOR DE VAZÃO	65
FIGURA 29 – TRANSMISSOR DE PRESSÃO	66
FIGURA 30 – TRANSMISSOR DE PRESSÃO DURANTE AFERIÇÃO	67
FIGURA 31 – FOTÔMETRO HI96721	68
FIGURA 32 – MEDIDOR DE pH/ORP/TEMPERATURA.....	69
FIGURA 33 – BOROSCÓPIO MENTOR VISUAL IQ DA GE	70
FIGURA 34 – SISTEMA UTILIZADO PARA ANÁLISE POR ULTRASSOM.....	71
FIGURA 35 – INTERFACE <i>LABVIEW</i>	72
FIGURA 36 – RESERVATÓRIO ANTES E APÓS O ENSAIO	80
FIGURA 37 – ÁREAS DA SEÇÃO DE TESTE ANALISADA.....	88
FIGURA 38 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E01.1)	89
FIGURA 39 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E01.2)	90
FIGURA 40 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E01.3)	91
FIGURA 41 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E02.1)	92
FIGURA 42 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E02.2)	93
FIGURA 43 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E02.3)	94
FIGURA 44 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E03.1)	95
FIGURA 45 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E03.2)	96
FIGURA 46 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E03.3)	97
FIGURA 47 – ULTRASSOM COMERCIAL UTILIZADO.....	99
FIGURA 48 – METALOGRAFIA MEV TUBO ÍNTEGRO.....	101
FIGURA 49 – METALOGRAFIA MEV E01.....	101
FIGURA 50 – METALOGRAFIA MEV E02.....	102
FIGURA 51 – ESPECTROS EDS TUBO ÍNTEGRO	103
FIGURA 52 – ESPECTROS EDS E01	104
FIGURA 53 – ESPECTROS EDS E02.....	105
FIGURA 54 – SEÇÕES DE CORTE METALOGRAFIA	122
FIGURA 55 – METALOGRAFIA NA SEÇÃO TRANSVERSAL (AMPLIAÇÃO 500X)	123
FIGURA 56 – METALOGRAFIA NA SEÇÃO LONGITUDINAL RADIAL (AMPLIAÇÃO 500X)	123

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – TEMPERATURA DO FLUIDO E AMBIENTE X TEMPO (E03)	76
GRÁFICO 2 – VELOCIDADE E PRESSÃO X TEMPO (E03)	77
GRÁFICO 3 – TEOR DE ÍONS DE FERRO (E01)	78
GRÁFICO 4 – TEOR DE ÍONS DE FERRO (E02)	79
GRÁFICO 5 – TEOR DE ÍONS DE FERRO (E03)	79
GRÁFICO 6 – DESGASTE TEÓRICO MODELO SANCHEZ-CALDERA (E01)....	82
GRÁFICO 7 – DESGASTE TEÓRICO MODELO SANCHEZ-CALDERA (E02)....	82
GRÁFICO 8 – DESGASTE TEÓRICO MODELO SANCHEZ-CALDERA (E03)....	83
GRÁFICO 9 – ANÁLISE MODELO SANCHEZ-CALDERA (1).....	84
GRÁFICO 10 – ANÁLISE MODELO SANCHEZ-CALDERA (2).....	84
GRÁFICO 11 – DESGASTE TEÓRICO MODELO KASTNER (E01)	85
GRÁFICO 12 – DESGASTE TEÓRICO MODELO KASTNER (E02)	86
GRÁFICO 13 – DESGASTE TEÓRICO MODELO KASTNER (E03)	86
GRÁFICO 14 – ANÁLISE MODELO KASTNER	87
GRÁFICO 15 – DIFRATOGRAMA DOS ENSAIOS E PADRÕES.....	107
GRÁFICO 16 – COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DO MODELO SANCHEZ- CALDERA.....	110
GRÁFICO 17 – COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DO MODELO KASTNER	110

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – FATOR GEOMÉTRICO DE KELLER	35
QUADRO 2 – TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE CORROSÃO.....	45
QUADRO 3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS MATEMÁTICOS	51
QUADRO 4 – VARIÁVEIS CONSIDERADAS NO MODELO DE KASTNER	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALOR DOS PARÂMETROS A0, A1 e A2.....	54
TABELA 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	59
TABELA 3 – ENSAIOS REALIZADOS	75
TABELA 4 – ESPECTROS EDS TUBO ÍNTEGRO	103
TABELA 5 – ESPECTROS EDS E01.....	104
TABELA 6 – ESPECTROS EDS E03.....	105
TABELA 7 – COMPARAÇÃO TAXAS DE DESGASTE DE FAC	111
TABELA 8 – MICRODUREZA SEÇÃO TRANSVERSAL (1).....	124
TABELA 9 – MICRODUREZA SEÇÃO TRANSVERSAL (2).....	124
TABELA 10 – MICRODUREZA SEÇÃO LONGITUDINAL RADIAL (1).....	124
TABELA 11 – MICRODUREZA SEÇÃO LONGITUDINAL RADIAL (2).....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3DPM	–	Medição de fase 3D - <i>3D Phase Measurement</i>
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	–	Corrente Alternada
Adim.	–	Número adimensional
AISI	–	<i>American Iron and Steel Institute</i>
API	–	<i>American Petroleum Institute</i>
ASM	–	American Society for Metals
ASTM	–	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BWR	–	Reatores de Água em Ebulição - <i>Boiling Water Reactors</i>
CEGB	–	<i>Central Electricity Generating Board</i>
CFD	–	Dinâmica dos Fluidos Computacional - <i>Computational Fluid Dynamics</i>
CSA	–	<i>Canadian Standards Association</i>
DC	–	Corrente Contínua
DIN	–	Instituto Alemão de Normas - <i>Deutsches Institut für Normung</i>
DO	–	Oxigênio Dissolvido - <i>Dissolved Oxygen</i>
DRX	–	Difração de Raios-X
EDF	–	<i>Électricité de France</i>
EDS	–	Espectroscopia por Energia Dispersiva de raios-x
END	–	Ensaio Não Destrutivo
EPDM	–	<i>Ethylene Propylene Diene Monomer (M-class) Rubber</i>
EPRI	–	<i>Electric Power Research Institute</i>
et al.	–	e outros
EV	–	Exame Visual
FAC	–	Corrosão Acelerada pelo Fluxo - <i>Flow Accelerated Corrosion</i>
GE	–	<i>General Electric</i>
HI	–	<i>Hanna Instruments</i>
HRSG	–	<i>Heat-Recovery Steam Generator</i>
HV	–	<i>Hardness Vickers</i>
IEA	–	Agência Internacional de Energia - <i>International Energy Agency</i>
JSME	–	<i>Japan Society of Mechanical Engineers</i>
LED	–	Diodo emissor de luz - <i>Light-Emitting Diode</i>
MEV	–	Microscópio Eletrônico de Varredura
MTD	–	<i>Maximum Target Distance</i>

NACE	–	<i>National Association of Corrosion Engineers</i>
NBR	–	Norma Brasileira Reguladora
NI	–	<i>National Instruments</i>
NR	–	<i>Natural Rubber</i>
ORP	–	Potencial de Oxirredução - <i>Oxidizing-Reducing Potential</i>
pH	–	Potencial Hidrogeniônico
ppb	–	partes por bilhão
ppm	–	partes por milhão
PTEF	–	Politetrafluoretileno
PVC	–	<i>Polyvinyl chloride</i>
PWR	–	Reatores de Água Pressurizada - <i>Pressurized Water Reactors</i>
SAE	–	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SE	–	<i>Secondary Electrons</i>
SEM	–	<i>Scanning Electron Microscope</i>
SHE	–	<i>Standard hydrogen electrode</i>
u.a.	–	unidade arbitrária
US	–	Ultrassom
USEPA	–	<i>United States Environment Protection Agency</i>
WD	–	<i>Work Distance</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ALFABETO LATINO

\sim	–	Valor aproximado	
A	–	Constante da taxa de reação	$[\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}]$
A_0	–	Constantes de equilíbrio dissolução magnetita	$[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}]$
A_1	–	Constantes de equilíbrio dissolução magnetita	$[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
A_2	–	Constantes de equilíbrio dissolução magnetita	$[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
Al	–	Alumínio	
B	–	Equação do modelo Kastner	
Ca	–	Cálcio	
C_{eq}	–	Concentração de íons solúvel em equilíbrio	$[\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}]$
C_{mo}	–	Concentração de íons solúveis interface metal/óxido	$[\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}]$
C_{wo}	–	Concentração de íons solúveis interface óxido/água	$[\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}]$
C_{∞}	–	Concentração de íons de ferro no escoamento dist.	$[\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}]$
Cr	–	Cromo	
Cu	–	Cobre	
d	–	Diâmetro interno do tudo	$[\text{m}]$
D	–	Difusividade	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
D_{EM}	–	Dissolução na superfície externa da magnetite	
D_{T}	–	Corrosão total	
E	–	Constante da taxa de reação	$[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}]$
f	–	Fração de metal oxidado convertido em magnetita	
$F(\square)$	–	Função descrita em consideração da variável \square	
FAC_{taxa}	–	Taxa de FAC	$[\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}]$
Fe	–	Ferro	
Fe^{+2}	–	Íon ferroso	
$\text{Fe}(\text{OH})$	–	Hidróxido de ferro	
FeOH^+	–	Íon de Fe^{+2} em solução hidrolisada	
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	–	Hidróxido de ferro (II) ou hidróxido ferroso	
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	–	Hidróxido de ferro (III) ou hidróxido férrico	
$\text{Fe}(\text{OH})_x^{(2-x)+}$	–	Óxidos de ferro ($x = 0, 1, 2$ e 3)	
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	–	Hematita	
Fe_3O_4	–	Magnetita	

FeOOH	–	Hematita hidratada	
α -FeOOH	–	Goethita	
γ -FeOOH	–	Lepidocrocita	
F_{IF}	–	Fluxo de íons de ferro	
g	–	Teor de oxigênio	[$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]
h	–	Teor de cromo e molibdênio somados	[%]
$h_{\text{sucção}}$	–	Perda devido ao atrito na tubulação de sucção	[mca]
H^+	–	Íon de hidrogênio	
H_2	–	Hidrogênio gasoso	
H_2O	–	Água líquida	
H_2O_2	–	Peróxido de hidrogênio	
H_A	–	Pressão atmosférica	[mca]
H_S	–	Altura estática	[mca]
H_{VP}	–	Pressão de vapor	[mca]
k	–	Constante da taxa de reação	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
k_p	–	Constante da taxa de corrosão parabólica	[$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
K	–	Coeficiente de transferência de massa	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
K_c	–	Fator geométrico de Keller	[Adim.]
K_x	–	Constante de equilíbrio ($x = 0, 1, 2$ e 3)	
L_M	–	Comprimento da região de entrada fluido turbulento	[m]
\dot{m}	–	Taxa de desgaste (modelo Sanchez-Caldera)	
M_{Fe}	–	Massa molar do ferro	[$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$]
Mn	–	Manganês	
Mo	–	Molibdênio	
N	–	Nitrogênio	
N	–	Equação do modelo Kastner	
NPSH	–	<i>Net Positive Suction Head</i>	
NPSH_D	–	<i>NPSH disponível</i>	
NPSH_R	–	<i>NPSH requerido</i>	
O	–	Oxigênio	
O_2	–	Oxigênio gasoso	
OH^-	–	Hidroxila	
P	–	Fósforo	
®	–	Marca registrada	

R	–	Constante universal dos gases	[J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹]
R/D	–	Razão entre raio de curvatura e o diâmetro do tubo	
Re	–	Número de Reynolds	[Adim.]
S	–	Enxofre	
Sc	–	Número de Schmitt	[Adim.]
Sh	–	Número de Sherwood	[Adim.]
Si	–	Silício	
t	–	Temperatura	[°C]
T	–	Temperatura	[K]
TM	–	Trademark	
V	–	Velocidade	[m·s ⁻¹]
x	–	Variável que assume o valor de zero a três	
X	–	Título do vapor	[%]
Z	–	Comprimento de tubo analisado no boroscópio	[mm]

ALFABETO GREGO

α	–	Constante do número de Sherwood	[Adim.]
β	–	Constante do número de Sherwood	[Adim.]
γ	–	Constante do número de Sherwood	[Adim.]
δ	–	Espessura do óxido de ferro	[m]
σ	–	Desvio padrão	
θ	–	Porosidade do óxido de ferro	[Adim.]
μ	–	Viscosidade dinâmica	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]
ν	–	Viscosidade cinemática	[m ² ·s ⁻¹]
ρ_f	–	Massa específica do fluido	[kg·m ⁻³]
ρ_{Fe}	–	Massa específica do ferro	[g·cm ⁻³]
τ	–	Tempo	[h]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	OBJETIVOS	23
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	25
2.1	CORROSÃO ACELERADA PELO FLUXO (FAC)	25
2.1.1	Antecedentes históricos da FAC	25
2.1.2	Mecanismo da FAC	26
2.1.3	Parâmetros	30
2.1.3.1	<i>Efeito do número de fases.....</i>	<i>31</i>
2.1.3.2	<i>Efeito da temperatura</i>	<i>32</i>
2.1.3.3	<i>Efeito da velocidade de escoamento</i>	<i>33</i>
2.1.3.4	<i>Efeito da geometria</i>	<i>34</i>
2.1.3.5	<i>Efeito do material.....</i>	<i>36</i>
2.1.3.6	<i>Efeito do Potencial Hidrogeniônico (pH)</i>	<i>38</i>
2.1.3.7	<i>Efeito do oxigênio</i>	<i>39</i>
2.1.3.8	<i>Efeito do Potencial de Oxirredução (ORP)</i>	<i>40</i>
2.1.4	Testes de FAC.....	42
2.1.5	FAC em baixa temperatura.....	43
2.2	TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DA CORROSÃO	45
2.2.1	Exame Visual (EV)	46
2.2.1.1	<i>Medição de Fase 3D (3DPM)</i>	<i>46</i>
2.2.2	Ultrassom (US).....	48
3	MODELOS MATEMÁTICOS.....	50
3.1	MODELO SANCHEZ-CALDERA.....	52
3.2	MODELO KASTNER	55
4	MATERIAIS E MÉTODOS	57
4.1	METODOLOGIA DE ENSAIO	57
4.2	MATERIAL.....	58
4.2.1	Corpo de prova.....	58
4.2.2	Composição química	59
4.3	FLUIDO UTILIZADO.....	59

4.4	PROJETO DA BANCADA GERADORA DE FAC	60
4.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	64
4.5.1	Instrumentos utilizados	64
4.5.1.1	<i>Termopar</i>	65
4.5.1.2	<i>Medidor de Vazão</i>	65
4.5.1.3	<i>Transmissor de pressão</i>	66
4.5.1.4	<i>Fotômetro</i>	67
4.5.1.5	<i>Medidor de pH/ORP/temperatura</i>	69
4.5.1.6	<i>Boroscópio</i>	70
4.5.1.7	<i>Ultrassom</i>	71
4.5.2	Aquisição de dados	71
4.5.3	Etapas do ensaio	73
5	RESULTADOS	75
5.1	ENSAIOS REALIZADOS	75
5.2	ANÁLISE DA TEMPERATURA	76
5.3	ANÁLISE HIDRODINÂMICA	77
5.4	TEOR DE ÍONS DE FERRO NA ÁGUA	78
5.5	CÁLCULOS TEÓRICOS	81
5.5.1	Modelo teórico de Sanchez-Caldera	81
5.5.2	Modelo empírico de Kastner	85
5.6	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	88
5.6.1	Medidor de Fase 3D (3DPM)	88
5.6.2	Ultrassom	98
5.7	METALOGRAFIA	99
5.8	ÓXIDO FORMADO	100
5.8.1	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	100
5.8.2	Espectroscopia por Energia Dispersiva de raios-x (EDS)	102
5.8.3	Difração de Raios-X (DRX)	106
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E DISCUSSÕES	109
7	CONCLUSÕES E PRÓXIMOS TRABALHOS	112
7.1	CONCLUSÕES	112
7.2	RECOMENDAÇÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS	113
	REFERÊNCIAS	115

APÊNDICES.....	121
APÊNDICE A – METALOGRAFIA E MICRODUREZA DO MATERIAL....	122
APÊNDICE B – PROJETO DO SISTEMA GERADOR DE FAC.....	125
APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS <i>LABVIEW</i> - ULTRASSOM	143
APÊNDICE D – DIAGRAMA DE BLOCOS <i>LABVIEW</i> AQUISIÇÃO - DADOS	144
ANEXOS	146
ANEXO A – DADOS BOMBA CENTRÍFUGA.....	147
ANEXO B – CERTIFICADO CALIBRAÇÃO MEDIDOR DE VAZÃO	151
ANEXO C – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO MANÔMETRO.....	153
ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO MEDIDOR PH/ORP/TEMPERATURA.....	155
ANEXO E – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO BOROSCÓPIO	157

1 INTRODUÇÃO

Diferentes processos de degradação como erosão, cavitação, corrosão, e outros, podem ocorrer nos materiais resultando em falhas e perda de espessura em tubos/componentes (MACIEJCZYK, 2016). Como estes processos são distintos, além das reações químicas e eletroquímicas, envolvendo materiais dissolvidos no próprio fluido, os efeitos hidrodinâmicos e físicos devem ser considerados também para caracterizar as interações entre o fluido de trabalho e a parede sólida.

Algumas formas de corrosão generalizada são muito comuns. No entanto, uma forma menos familiar de corrosão é a Corrosão Acelerada pelo Fluxo (FAC), sendo, segundo Trevin (2012), a mais preocupante em tubulações e equipamentos de aço carbono que operam em altas temperaturas, em relação a outros materiais (CARVALHO, 2017).

O mecanismo de controle da FAC tem sido implantado em usinas termelétricas, assim como em plantas industriais, devido à sua maior relevância. A ocorrência da FAC é típica em sistemas que operam com o ciclo combinado, como as usinas termelétricas HRSG (*Heat-Recovery Steam Generator*). A FAC pode ocorrer em diferentes locais da planta, como evaporadores, condensadores, desaeradores, coletores, tubulação de alimentação de água e outros.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), em 2015, 76,9 % da produção mundial de energia elétrica foi produzida em centrais termelétricas (IEA, 2017). A FAC pode resultar em grandes perdas, como financeira, de pessoas e ambiental, sendo de grande relevância mundial. Como citado por Shashidhar e Patnaik (2015), 40 % dos tubos em plantas que operam em ciclos combinados de turbinas a gás e a vapor (HRSG) falham por FAC.

Quando não levada em consideração na operação/manutenção das plantas a FAC pode levar à falha prematura de equipamentos. Os equipamentos das HRSGs geralmente são projetados para 25 anos de operação, no entanto, em quatro unidades do Qatar, foram detectados vazamentos em apenas três anos de operação (SHASHIDHAR; PATNAIK, 2015).

Para realizar a inspeção de áreas suscetíveis à FAC, utilizam-se, usualmente, técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END). Porém, as técnicas usuais (ultrassom, radiografia, correntes parasitas e outras) são demoradas, e em alguns lugares as mesmas não podem ser aplicadas ou o acesso é difícil. Além disso, algumas partes da

planta precisam ter sua operação interrompida para que as referidas técnicas possam ser aplicadas.

Inspeções regulares muitas vezes não são possíveis devido à acessibilidade, ou no caso de usinas nucleares, devido à radiação. Assim sendo, é difícil de constatar a integridade estrutural de um componente. Mesmo com inspeções regulares ainda existem incertezas sobre a localização da parte mais degradada.

Por isso, para a identificação de áreas que ocorrem a FAC é necessário incorporar funcionalidades preditivas que permitam a identificação de áreas da planta suscetíveis à redução de espessura com base nos parâmetros do sistema e dados do material. Apesar disso, a precisão das predições pode ser questionável devido à excessiva simplificação da química do fluido e a falta do uso da composição química real do material (JONAS, 2004). Com a evolução do conhecimento da indústria e o crescimento do volume de dados, melhores serão os programas para monitoramento e mitigação da FAC.

Segundo Walker¹ (2004 citado por SUBRAMANIAN et al., 2012), a taxa de corrosão do sistema primário² da tubulação é bastante diferente, assim como os parâmetros também são bastante distintos do sistema secundário³. Com isso, há a ocorrência da FAC em temperaturas menores do que as usuais. Os sistemas utilizados para a predição, podem não serem úteis/adequados a variação deste parâmetro. Dados sobre a FAC em temperaturas menores são raramente encontrados na literatura (YONEDA et al., 2016).

Este trabalho tem como finalidade verificar através de dados experimentais de FAC em baixa temperatura, a acurácia de modelos já desenvolvidos para a predição da FAC. O monitoramento da FAC será realizado por intermédio de técnicas de END e análises de propriedades do fluido ao longo dos ensaios.

1.1 OBJETIVOS

Avaliar a aplicabilidade dos modelos teóricos e empíricos existentes, usados na predição da taxa de redução de espessura devido à FAC em condições adversas

¹ WALKER, Z. H. Managing flow accelerated corrosion in carbon steel piping in nuclear plants, in: ASME Conference Proceedings, 2004, pp. 155–165.

² No sistema primário, de usinas nucleares, a água é aquecida pela energia térmica liberada pelo reator nuclear (fissão dos átomos de urânio).

³ No sistema secundário, de usinas nucleares, a água é aquecida pelo sistema primário transformando-se em vapor, que é utilizado na turbina para a produção de energia elétrica.

das encontradas, normalmente, em centrais termelétricas (água com pH neutro e temperatura de 50,0 °C).

Os objetivos específicos são:

- a) Analisar os pontos positivos e negativos dos modelos disponíveis na literatura disponível e escolher quais serão utilizados no trabalho;
- b) Projetar e construir uma bancada geradora de FAC, para levantar e registrar dados;
- c) Comparar os dados dos modelos escolhidos com os adquiridos experimentalmente, para detectar a eficácia desses para a predição da taxa de FAC;
- d) Examinar o comportamento das técnicas empregadas ao longo dos ensaios no monitoramento da FAC e relatar os pontos positivos e negativos de cada técnica. E, ainda identificar qual técnica, entre as utilizadas, melhor se adequa a esta função.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em seis capítulos, sendo eles a introdução; revisão de literatura; modelos matemáticos; material e método; resultados e discussões; e conclusão, além das referências, do apêndice e do anexo.

O capítulo dois é dedicado à revisão de literatura do tema que fundamenta o conceito da FAC, as pesquisas relacionadas à FAC em baixa temperatura e à descrição dos ensaios não destrutivos utilizados.

Dando sequência, o capítulo três apresenta as características dos principais modelos utilizados para a predição da FAC, sendo melhor apresentados posteriormente os modelos que serão utilizados no trabalho.

Já no capítulo quatro, são apresentados os materiais e os procedimentos experimentais utilizados para a realização dos ensaios.

Adiante, no quinto capítulo, são apresentados, os resultados obtidos dos modelos matemáticos e dos ensaios, e é realizada a discussão desses resultados.

No sexto capítulo, apresentam-se a conclusão da pesquisa e as propostas para trabalhos futuros.

Finalmente, constam as referências dos diferentes documentos consultados para o desenvolvimento dessa dissertação e na sequência o apêndice e o anexo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, será apresentada toda a parte referente às referências teóricas que são pertinentes ao tema da Corrosão Acelerada por Fluxo (FAC), assim como as referências pertinentes à parte metodológica da dissertação, como os Ensaios Não Destrutivos (END) utilizados no monitoramento dos ensaios.

2.1 CORROSÃO ACELERADA PELO FLUXO (FAC)

Primeiramente deve-se esclarecer que a FAC, em certas ocasiões, é nomeada erroneamente de erosão-corrosão. Com o passar do tempo a terminologia se tornou ambígua, sendo que o termo se referia tanto para o mecanismo conhecido como FAC quanto para os mecanismos no qual o óxido é quebrado de forma mecânica pelo impacto de partículas sólidas ou bolhas gasosas (ROBINSON; DREWS, 1999).

A definição de erosão-corrosão, de acordo com o Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica (EPRI), é o mecanismo de degradação do material causado juntamente por processos mecânicos e químicos. O termo erosão-corrosão inclui vários tipos de erosão e corrosão, enquanto a FAC é mais específica, causada por efeitos químicos e de transferência de massa. Não é errado chamar a FAC de erosão-corrosão, tendo em mente que a FAC se refere a um conjunto específico de condições onde não há processos mecânicos associados (DAIBER, 2004). Nota-se que a maioria dos códigos desenvolvidos para prever a perda de espessura não faz distinção entre a FAC e a erosão-corrosão (ALLOY; PLANTS, 2014).

2.1.1 Antecedentes históricos da FAC

A FAC, quando não detectada, pode acarretar no rompimento repentino do componente degradado, liberando vapor e água em alta temperatura nas áreas vizinhas da planta. Quando há um vazamento o fluido pode prejudicar os trabalhadores da planta e danificar equipamentos próximos. Ao longo dos anos, a FAC causou centenas de falhas em tubulações e equipamentos. As falhas aconteceram em plantas que utilizavam combustíveis fósseis e nuclear. No entanto, muitas vezes a causa da falha não foi detectada. Além disso, a indústria de geração de energia não compreendia completamente as condições em que ocorriam a FAC, em que regiões das plantas

devem ser procuradas e até mesmo encontradas, ou como mitigar quando for encontrada (DOOLEY, 1999).

Isso mudou, em 1986, quando um cotovelo do sistema de condensação rompeu na central nuclear de Surry, localizada nos Estados Unidos da América (FIGURA 1). A falha causou quatro mortes e dezenas de milhões de dólares em custos de reparo e perda de receita (DOOLEY, 1999). A FAC foi considerada a causa da falha. Por causa das mortes envolvidas e do alto grau de regulação aplicado às usinas nucleares, foi iniciado um intenso esforço de cooperação internacional para entender os parâmetros que afetam a FAC. A estratégia era que a compreensão da FAC permitiria o desenvolvimento de tecnologias para auxiliar as plantas a encontrar os danos antes que ocorresse a falha e tomar as devidas medidas para controlá-los (KELLEY, 2015).

FIGURA 1 – FALHA NO COTOVELO DO SISTEMA DE CONDENSAÇÃO DA PLANTA DE SURRY



FONTE: Alloy e Plants (2014)

2.1.2 Mecanismo da FAC

O processo de FAC consiste de duas etapas, a produção de ferro solúvel na interface óxido/fluido e a transferência dos produtos da corrosão para o escoamento (BETOVA et al., 2010). A corrosão é controlada exclusivamente pelo transporte de massa (difusão e convecção).

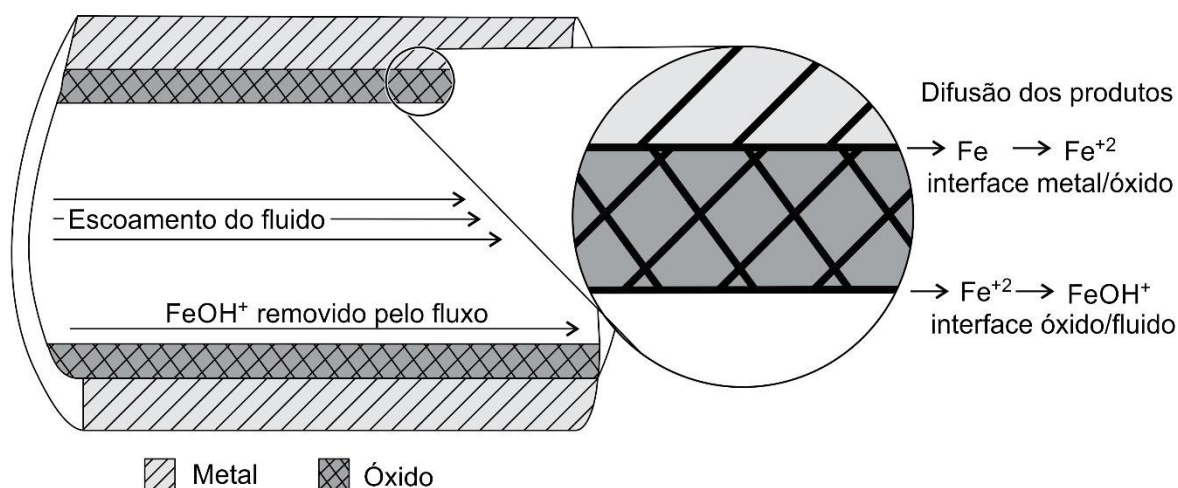
A camada de óxido protetora (filme de magnetita) que se forma na superfície interna é dissolvida, sendo as taxas de difusão e de dissolução os fatores limitantes (FUJIWARA et al., 2011). Elevadas taxas de FAC ocorrem em locais onde há altas taxas de transferência de massa, correspondendo ao escoamento turbulento das curvas, cotovelos, válvulas e outros (MATTSSON, 2001). Nesses locais, a camada protetora é dissolvida mais rapidamente, resultando em áreas menos protetoras e locais com taxa de corrosão elevadas. Isso leva a uma redução mais rápida da espessura do componente (TREVIN, 2012).

O mecanismo da FAC está representado esquematicamente na FIGURA 2. O ferro e a água reagem formando uma camada de óxido protetora na superfície. Este óxido dissolve-se na água formando íons ferrosos (Fe^{+2}) e a taxa de remoção de ferro (taxa de FAC) é controlada pela taxa de difusão próxima à superfície. O FeOH^+ é o íon de Fe^{+2} em solução hidrolisada. A difusão depende diretamente da concentração de íons de ferro solúveis na superfície do óxido e a taxa de FAC depende diretamente do aumento da velocidade de escoamento ou devido à turbulência (KAIN, 2014; KELLEY, 2015; MUHAMMADU; SHERIFF; HAMZAH, 2013; SONG et al., 2016).

Um segundo efeito da velocidade do escoamento está relacionado ao limite de solubilidade dos íons solúveis no fluido. O limite de solubilidade dos íons em um fluido é determinado por sua química específica de operação (temperatura e pH).

Assim que os íons solúveis atingem o escoamento a concentração se aproxima do limite de solubilidade e a dissolução seria reduzida se fosse uma solução estagnada. A velocidade do escoamento proporciona uma solução nova na superfície, com

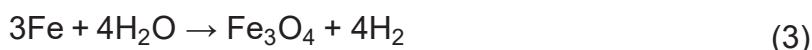
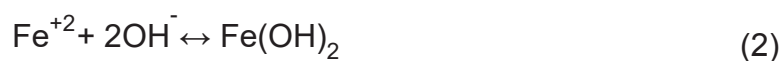
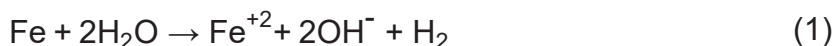
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MECANISMO DE FAC NO AÇO



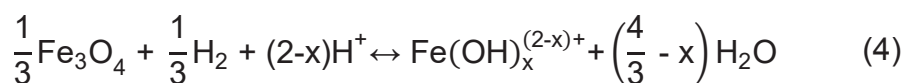
grande capacidade de absorver os íons solúveis, aumentando assim a taxa de corrosão com a velocidade, ocorrendo a FAC (KAIN, 2014).

De acordo com o Vepsalainen (2010a) e Vepsalainen e Saario (2010) o mecanismo de FAC pode ser descrito como a ação simultânea dos seguintes processos (FIGURA 3):

- a) Oxidação do ferro, em íons solúveis de ferro, e formação de magnetita (Fe_3O_4) na interface metal/óxido, como é descrito através das seguintes reações químicas:



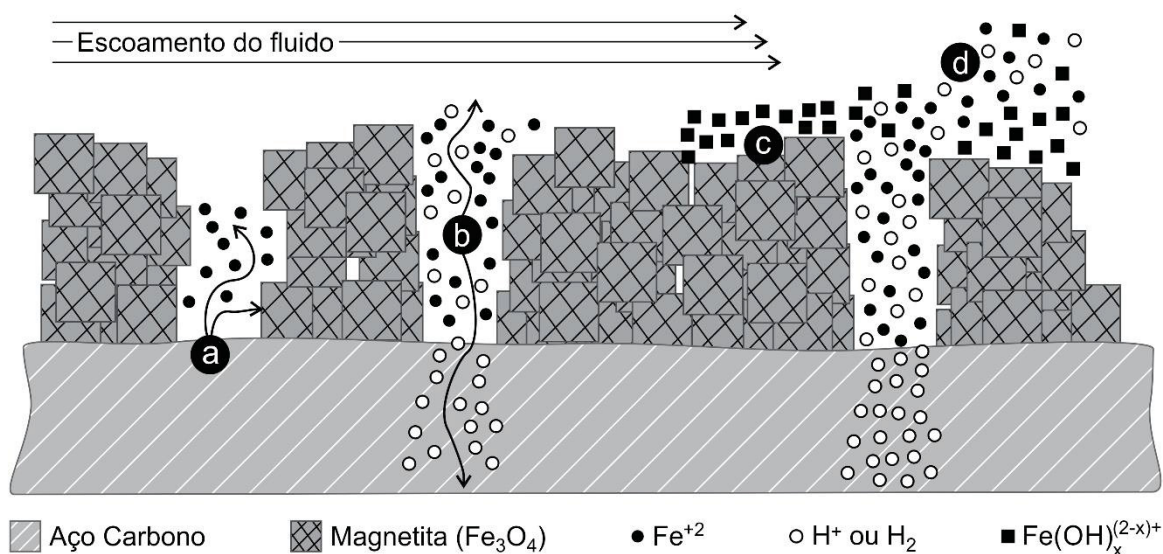
- b) Difusão dos radicais solúveis (ferro e hidrogênio) através do óxido poroso e do hidrogênio através do material;
c) Dissolução e redução da magnetita na interface óxido/água, representada pela seguinte reação química:



em que $\text{Fe}(\text{OH})_x^{(2-x)+}$ representa os diversos óxidos do ferro; e x é uma variável que assume valores de zero a três (SWEETON; BAES, 1970);

- d) Transferência dos íons de ferro solúvel para o escoamento. Neste processo os óxidos migram da interface metal/óxido, os íons solúveis na

FIGURA 3 – ESQUEMA DO MECANISMO DE FAC



FONTE: O autor (2019)

interface óxido/água difundem-se rapidamente para o escoamento e o hidrogênio é liberado para o ar após a difusão através do aço.

A taxa de corrosão é, geralmente, considerada inversamente proporcional à espessura da camada de óxido e a espessura do óxido é constante. O filme de magnetita na interface óxido/água é substituído por uma nova camada de mesma espessura na interface metal/óxido. A taxa de dissolução na superfície externa da magnetita pode ser escrita, como:

$$D_{EM} = k \cdot (C_{eq} - C_{wo}) \quad (5)$$

sendo que k é a constante da taxa de reação; C_{eq} é a concentração de íons ferro solúvel em equilíbrio com a magnetita; e C_{wo} é a concentração de íons solúveis na interface óxido/água (REMY; BOUCHACOURT, 1992).

A formação de íons de ferro na interface óxido/água representa uma parte da formação total de íons. Remy e Bouchacourt (1992) consideraram que esta parte é responsável pela metade da produção total. Sendo assim, a taxa de corrosão total (D_T) é igual ao dobro da formada na interface óxido/água (D_{EM}).

Existe também um segundo mecanismo, o fluxo de íons de ferro (F_{IF}), relacionado à transferência de íons de ferro para o escoamento que pode ser modelado como um fenômeno de transporte convectivo:

$$F_{IF} = K \cdot (C_{wo} - C_{\infty}) \quad (6)$$

em que K é o coeficiente de transferência de massa; C_{wo} é a concentração de íons solúveis na interface óxido/água; e C_{∞} é a concentração de íons de ferro no escoamento distante. O coeficiente de transferência de massa depende da velocidade do fluxo, geometria, turbulência, rugosidade da superfície e das propriedades físicas do fluido (PIETRALIK; SMITH, 2006).

Quando ambos os mecanismos se tornam estacionários, F_{IF} e D_T são iguais. Sendo assim, a produção de íons de ferro solúveis e o efeito de transferência de massa podem ser correlacionados pela seguinte equação:

$$D_T = 2 \cdot k \cdot K \cdot (C_{eq} - C_{\infty}) / (K + 2 \cdot k) \quad (7)$$

Através de testes Remy e Bouchacourt (1992) concluíram que utilizando água como fluido, e sendo ela desoxigenada e alcalina, o C_{∞} é aproximadamente zero e a FAC é proporcional a C_{eq} e K . A taxa de reação é mais rápida do que a transferência de massa ($k \gg K$). Com isso, a relação entre o escoamento, coeficiente de transferência de massa e concentração de íons de ferro no equilíbrio se torna:

$$D_T = K \cdot C_{eq} \quad (8)$$

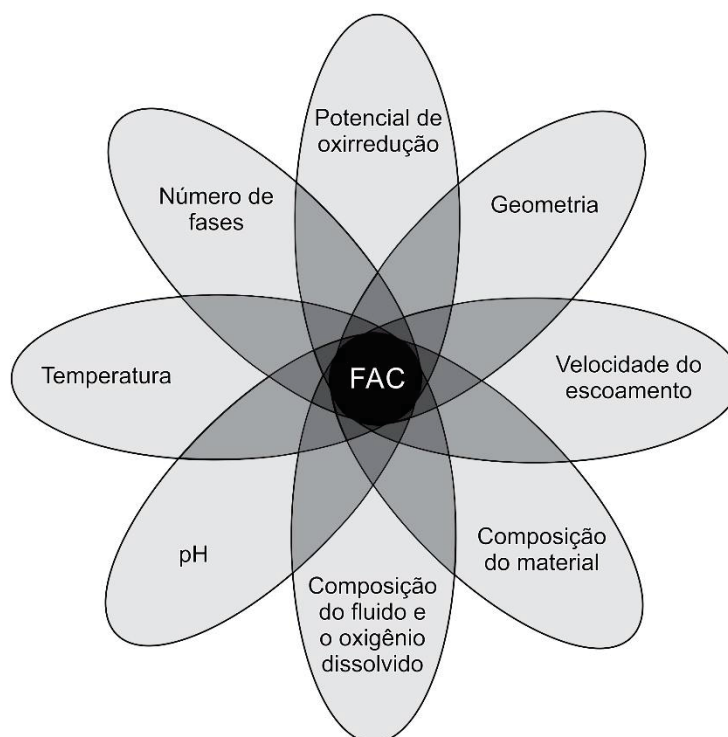
Assim, cada parâmetro que governa o fenômeno influencia através da transferência de massa e/ou da concentração de íons de ferro. Por um lado, a concentração de íons de ferro depende de todas as condições químicas que conduzem ao equilíbrio da equação (4), de oxirredução. Por outro lado, as condições termo hidráulicas próximas ao filme de magnetita influenciam o coeficiente de transferência de massa (REMY; BOUCHACOURT, 1992).

2.1.3 Parâmetros

De acordo com observações de FAC encontradas foi estudada a influência de vários parâmetros. Com isso, podem ser relacionados os seguintes parâmetros dos quais o processo depende de maneira mais significativa:

- a) Características do fluido (pH, potencial de oxirredução, número de fases, oxigênio dissolvido e outros);
- b) Temperatura e cinética da reação química;
- c) Condições de transferência de massa ou hidrodinâmica (velocidade do escoamento, geometria, rugosidade e outros);
- d) Composição química do aço (teor de cromo, molibdênio e cobre).

FIGURA 4 – FATORES QUE INFLUENCIAM A FAC



FONTE: O autor (2019)

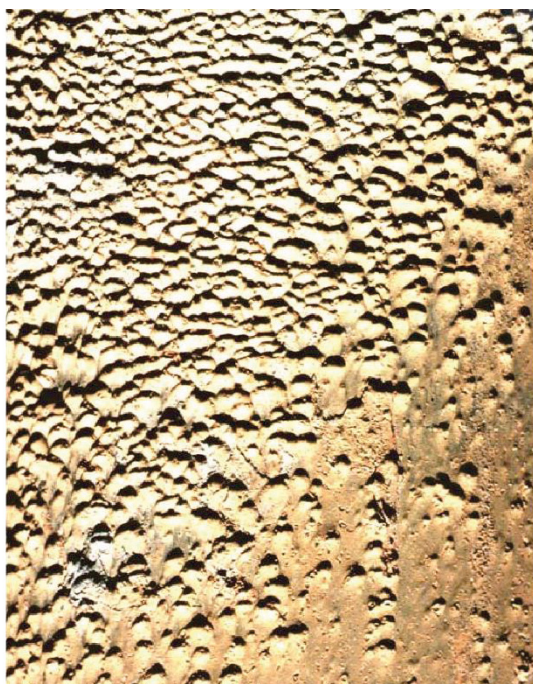
A taxa de FAC depende da interação complexa desses vários parâmetros, como é ilustrado esquematicamente na FIGURA 4. A tensão superficial e o coeficiente de transferência de massa dos produtos de corrosão para o escoamento são afetados pela configuração geométrica dos componentes; orientação da tubulação; número de Reynolds; química e a temperatura do fluido; composição química do material; e o tipo de escoamento (BETOVA; BOJINOV; SAARIO, 2010). O efeito hidrodinâmico do fluido de trabalho na FAC tem sido investigado usando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) (AHMED, 2010).

2.1.3.1 Efeito do número de fases

A FAC monofásica ocorre quando micro pites formados crescem até se tocarem, resultando assim em uma aparência áspera à superfície. A superfície interna degradada das tubulações é caracterizada pela sobreposição de "conchas"/"marcas de ferraduras" que dão uma aparência de casca de laranja (FIGURA 5) (KAIN, 2014). Não há a evidência de qualquer dano mecânico (erosão) e a perda de espessura é exclusivamente devido ao fenômeno de dissolução química (DOOLEY, 2008).

A FAC bifásica tem o mecanismo de dissolução do óxido semelhante à da FAC monofásica, mas esse tipo de degradação ocorre em tubos que transportam vapor úmido. O vapor condensa parcialmente próximo na parede, formando uma fase líquida

FIGURA 5 – FAC MONOFÁSICA



FONTE: Dooley (2006)

FIGURA 6 – FAC BIFÁSICA



FONTE: Dooley (2006)

que flui em uma camada fina. O vapor no núcleo do escoamento se move muito mais rápido do que a fase líquida, e a diferença de velocidade criam forças de cisalhamento na interface de vapor/líquido. Se essa força for maior do que a força de tensão superficial na interface, algum líquido será arrancado da camada líquida e transportado com o vapor. Este líquido formará gotículas que serão aprisionadas e aceleradas no núcleo de vapor. Uma fração deste líquido poderá colidir com a camada de óxido, podendo quebrá-la e expor as áreas subjacentes à corrosão. As superfícies expostas a este tipo de degradação bifásica têm uma aparência de "listras de tigres" (ver FIGURA 6) (KAIN, 2014).

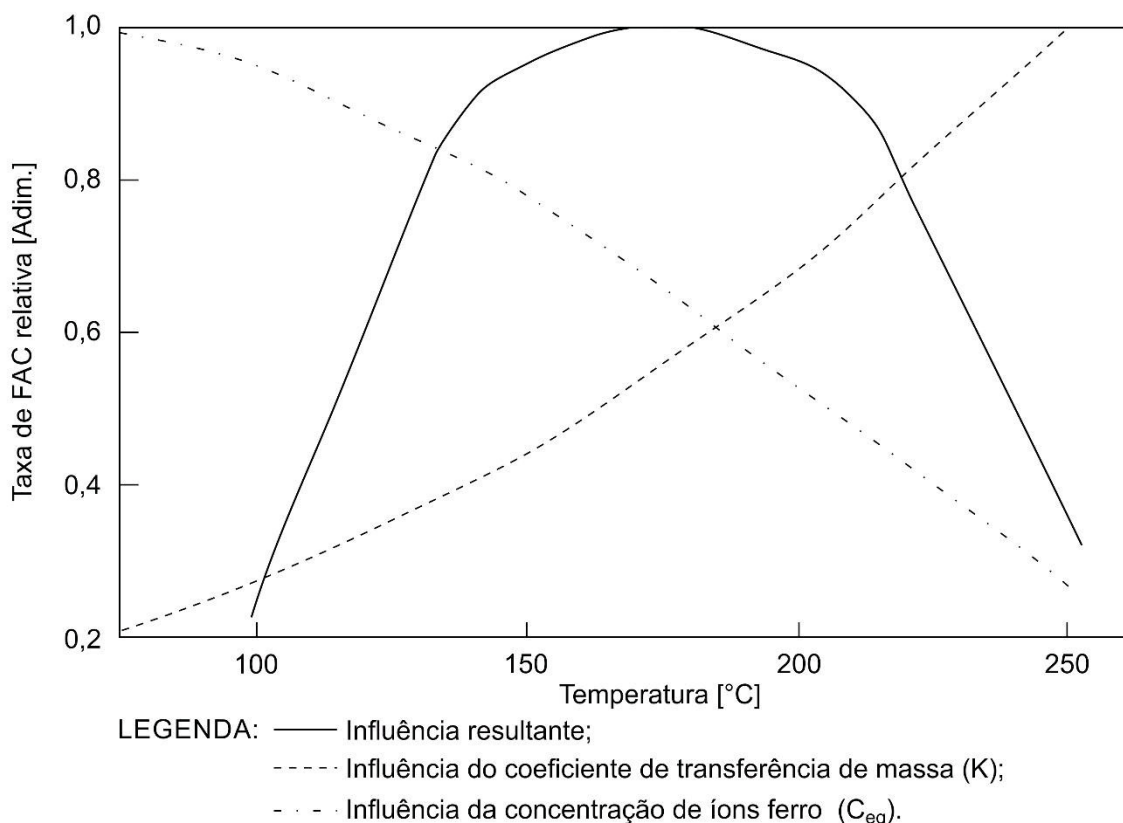
A FAC bifásica é delineada por uma superfície que, geralmente, é de coloração preta (filme esbelto de magnetita) e brilhante ou parece esmaltada. Contêm marcas parecidas com pites, que às vezes têm a aparência de "conchas"/"marcas de ferradura", similares às observadas na FAC monofásica (DOOLEY, 2008).

2.1.3.2 Efeito da temperatura

Uma variável importante que afeta a resistência à FAC é a temperatura. A maioria dos casos relatados de danos por FAC em condições monofásicas ocorreram dentro do intervalo de temperatura de 100 a 230 °C, sendo que este intervalo é deslocado para temperaturas mais elevadas, entre 140 a 260 °C, se o escoamento for bifásico. A localização exata da taxa de desgaste máxima varia com pH, teor de oxigênio dissolvido e outras variáveis do ambiente. Experiências têm mostrado que a taxa de desgaste é mais elevada, em escoamentos monofásicos, quando a temperatura é aproximadamente 150 °C (FORD et al., 2015).

Diversos estudos têm resultado no "gráfico em forma de sino" para a relação entre temperatura e taxa de FAC (ver FIGURA 7). Essa forma de sino é o resultado de uma dupla dependência, descrita pela equação (8) (REMY; BOUCHACOURT, 1992). Conforme a temperatura aumenta, a concentração de íons ferro solúvel em equilíbrio com a magnetita diminui, isso significa que, na baixa temperatura a capacidade da água para remover íons de ferro é a máxima. Por outro lado, o efeito de temperatura é muito importante na viscosidade do escoamento e na difusividade dos íons de ferro, que regulam a transferência de massa. Isso explica porque nas curvas publicadas, a posição do máximo depende claramente com as condições de teste usadas (KAIN, 2014; REMY; BOUCHACOURT, 1992; VEPSALAINEN, 2010b).

FIGURA 7 – A INFLUÊNCIA CALCULADA DA TEMPERATURA



FONTE: Adaptada de Remy e Bouchacourt (1992)

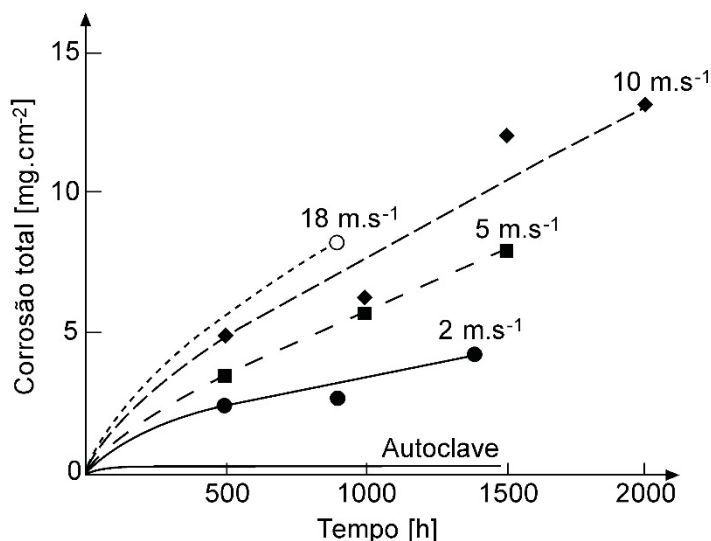
Além disso, a FAC pode ocorrer em sistemas monofásicos em baixas temperaturas sob condições de operação incomuns e severas, como, por exemplo, em altas velocidades de escoamento e pH abaixo de oito (ALLOY; PLANTS, 2014).

2.1.3.3 Efeito da velocidade de escoamento

À medida que a velocidade é mais elevada, espera-se uma taxa de desgaste mais elevada. A exagerada transferência de massa associada a fluxos turbulentos é o processo fundamental na dissolução acelerada da camada de óxido protetor. O efeito do fluxo é melhor descrito em termos do coeficiente de transferência de massa.

A FIGURA 8 relaciona o aumento da taxa de FAC devido ao aumento na velocidade de escoamento, com temperatura de 300 °C. A corrosão total devido à água quente circulando é de 10 a 25 vezes maior do que as na autoclave e o comportamento da corrosão, para o escoamento turbulento, é uma função linear da velocidade após 400 horas de operação do ensaio de Trevin (2012).

FIGURA 8 – TAXA DE FAC EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO



FONTE: Adaptada de Trevin (2012)

A velocidade de escoamento, segundo Trevin (2012), pode ter diferentes efeitos no processo de corrosão:

- Em baixas velocidades, a taxa de FAC é controlada pela transferência de massa de íons de ferro solúveis na superfície do óxido e conforme a concentração diminui a taxa de FAC aumenta;
- Em velocidades intermediárias, a taxa de transferência de massa pode ser muito mais rápida do que taxa de oxidação na superfície do metal. A taxa de FAC se torna controlada pela reação química de corrosão;
- Em velocidades muito altas, as tensões de cisalhamento da superfície são suficientemente altas para quebrar ou remover mecanicamente a camada de óxido, fazendo com que se inicie um processo de erosão.

Para este trabalho utilizou-se a velocidade de escoamento como parâmetro, pode-se utilizar a tensão de cisalhamento do fluido no lugar. Segundo Trevin (2012) quando a tensão é superior a 10^5 Pa o escoamento começa atingir seu ponto crítico e começa o processo de erosão.

2.1.3.4 Efeito da geometria

O efeito da geometria dos tubos e de seus componentes também é um fator contribuinte para a ocorrência da FAC (PIETRALIK, 2012). O layout geral das tubulações, como o posicionamento de cotovelos, têes e a geometria da superfície interna; como o acabamento superficial das raízes de solda; mudanças de fluxo nos corpos

das válvulas; orifícios; redutores de pressão; áreas onde fluxo, pressão e temperatura são medidos; e em regiões que a superfície interna termina ou a geometria muda muito em distâncias curtas, são todos fatores que contribuem para a ocorrência da FAC (ALLOY; PLANTS, 2014).

Para representar os efeitos do aumento da turbulência devido às conexões, geralmente é usado um fator geométrico (K_c) (QUADRO 1) (AHMED, 2010; KESHTKAR et al., 2016). O fator geométrico pode ser obtido de três diferentes modos, sendo eles, o uso de valores tabelados para geometrias mais simples; experiência obtida através do acompanhamento da planta/componente com o tempo; ou calculando, usando uma abordagem de elementos finitos (BETOVA; BOJINOV; SAARIO, 2010).

QUADRO 1 – FATOR GEOMÉTRICO DE KELLER

TIPO DE ESCOAMENTO			VEL. DE REFERÊNCIA	Kc
	nos tubos		Velocidade de impacto	1,00
	nas pás			1,00
	nas placas			1,00
	distribuidores e orifícios			0,75
				0,60
	R/D=0,5	curvas e saídas dos difusores	Velocidade do fluido	0,52
	R/D=1,5			0,30
	R/D=2,5			0,23
	junções			0,15
	entradas de tubo (canto reto)		Velocidade do fluido	0,16
	obstruções			0,16
	tubos retos		Velocidade do fluido	0,04

FONTE: Adaptado de Kastner et al. (1990)

O QUADRO 1, montado por Kastner et al. (1990), fornece uma melhor visualização dos fatores geométricos propostos por V. H. Keller. Esses fatores estão relacionados à velocidade/turbulência criada pela geometria ou conexão. Valores maiores

indicam uma maior propensão no distúrbio do fluxo e, portanto, turbulência, o que aumenta o coeficiente de transferência de massa.

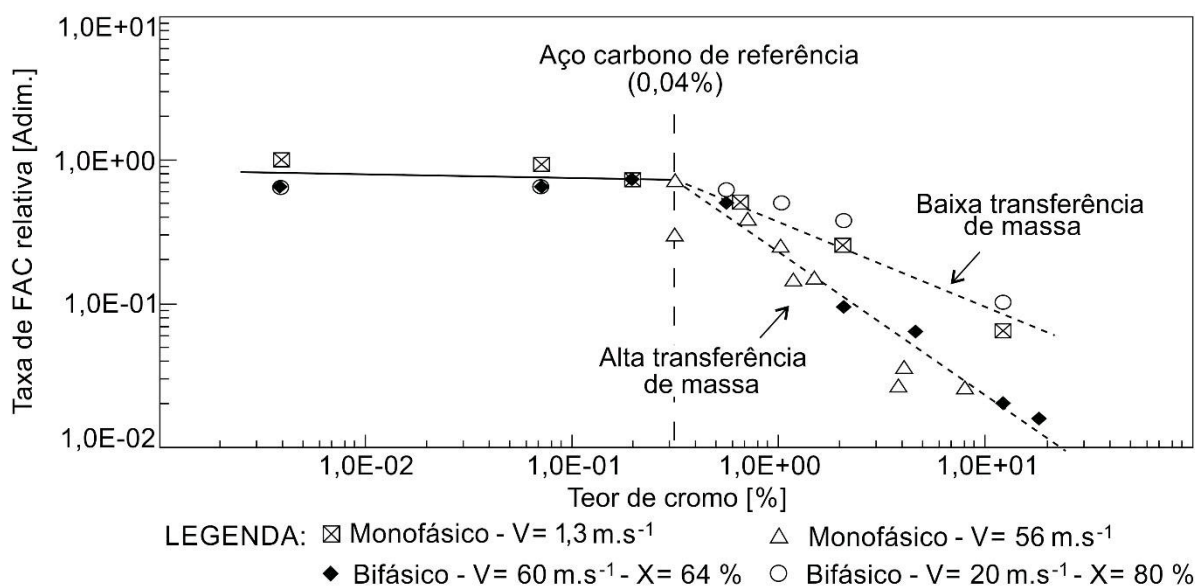
Embora a FAC seja caracterizada por uma redução geral na espessura da parede do tubo, para um determinado componente ela pode ocorrer, com maior frequência, em uma área limitada, devido à alta turbulência local (BETOVA; BOJINOV; SAARIO, 2010).

2.1.3.5 Efeito do material

A estabilidade e a solubilidade da camada de óxido dependem fortemente da composição química do material. O aço carbono é extremamente suscetível à FAC, enquanto o aço inoxidável austenítico é praticamente imune à FAC. O elemento de liga mais importante é o cromo (FIGURA 9), toda via, outros elementos de liga, como o molibdênio e o cobre, também têm efeito benéfico. Uma liga de aço com um teor de cromo tão baixo quanto 1,0 % terá uma taxa de FAC baixa ou desprezível. Há evidências de que, mesmo com o teor de cromo muito baixo, há uma redução significativa na taxa de FAC (TREVIN, 2012).

A FIGURA 9 representa a taxa relativa de FAC em função do teor de cromo e indicada que teores de cromo menor do que 0,04 % não tem efeito na taxa de FAC relativa. Para teores de cromo maiores que 0,04 % a taxa de FAC diminui linearmente na escala logarítmica (TREVIN, 2012). Pode se notar que para o teor de cromo de

FIGURA 9 – EFEITO DO CROMO NA TAXA DE FAC RELATIVA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS

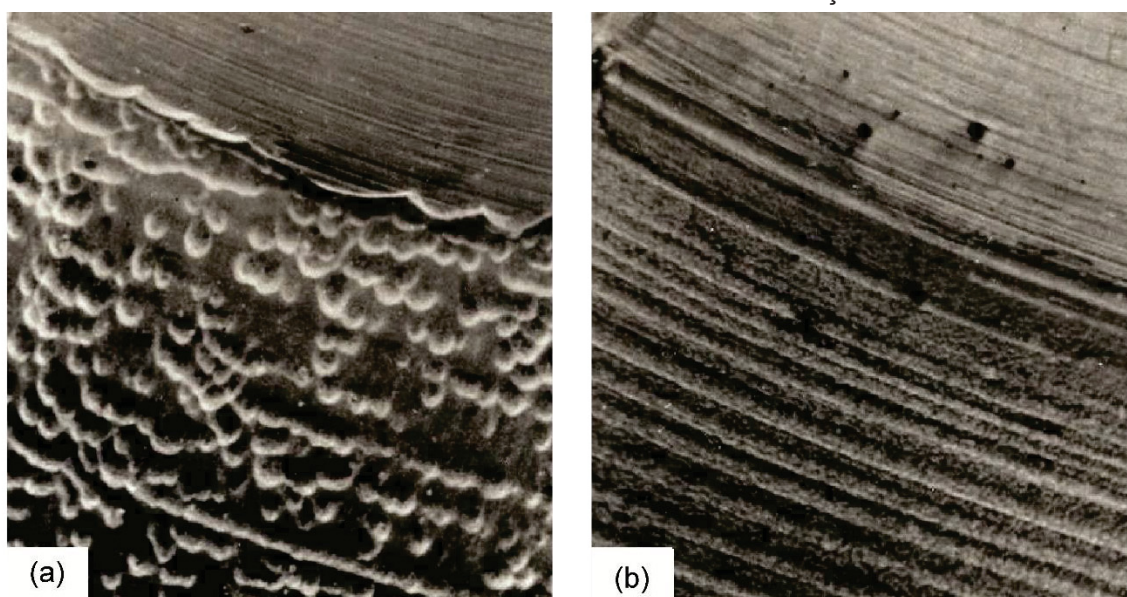


FONTE: Adaptada de Trevin (2012)

apenas 0,1 % na condição de alta transferência de massa, a taxa de FAC é 2,5 vezes menor do que ter uma quantidade de cromo menor que 0,04 %.

A FIGURA 10 mostra o efeito do teor de 1,0 % de cromo na composição do material. As imagens foram realizadas após 2280 horas de ensaio sob a temperatura de 155 °C e pH de 9,1 (POULSON, 2014).

FIGURA 10 – EFEITO DE ELEMENTOS DE LIGA EM AÇOS NA FAC



FONTE: Adaptada de Poulson (2014)

LEGENDA: (a) Superfície do aço carbono, (b) Superfície do aço 1Cr-½Mo

O efeito da composição química na taxa de FAC, segundo Remy e Bouchacourt (1992), pode ser descrita pela relação de Ducreux:

$$\frac{\text{Taxa de FAC}}{\text{Taxa de FAC}_{\text{máx.}}} = \frac{1}{83 \cdot [\text{Cr}]^{0,89} \cdot [\text{Cu}]^{0,25} \cdot [\text{Mo}]^{0,20}} \quad (9)$$

Existe também de acordo com Trevin (2012) outra relação desenvolvida por Huijbregts.

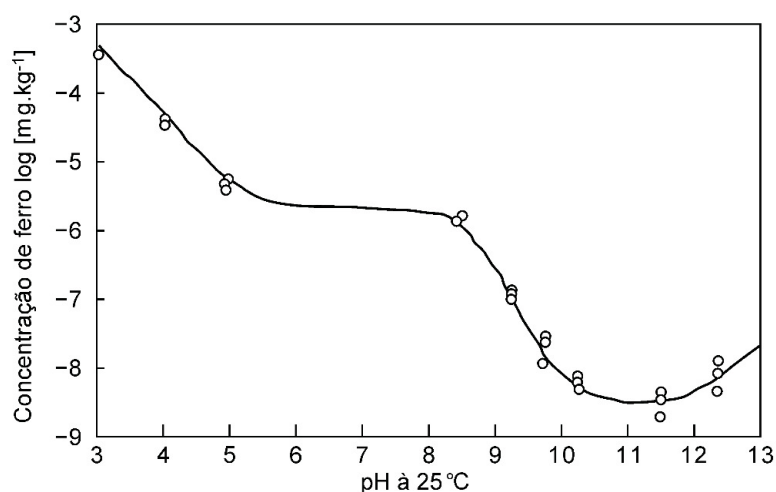
$$\frac{\text{Taxa de FAC}}{\text{Taxa de FAC}_{\text{máx.}}} = \frac{1}{0,61 + 2,43 \cdot [\text{Cr}] + 1,64 \cdot [\text{Cu}] + 0,3 \cdot [\text{Mo}]} \quad (10)$$

sendo que [Cr], [Cu] e [Mo] são as concentrações expressas em porcentagem. E essas relações foram verificadas para concentrações muito baixas e para o ferro puro. O efeito da composição química é muito importante na estratégia de troca de componentes, com o intuito de reduzir a degradação de FAC (BETOVA; BOJINOV; SAARIO, 2010).

2.1.3.6 Efeito do Potencial Hidrogeniônico (pH)

A taxa de FAC depende fortemente do pH do fluido. Em geral, o aumento do valor de pH reduz o desgaste (FIGURA 11). A taxa de FAC em aços carbono aumenta rapidamente na faixa do pH entre 7,0 a 9,0 e cai fortemente acima do pH 9,2 (PORT,1998). À medida que o fluido se torna mais ácido, espera-se perdas maiores de espessura. O valor do pH pode ser afetado pela escolha dos agentes de controle (amônia, hidrazina e outros) e por impurezas (cloretos, sulfatos e outros) (FRIEND; DOOLEY, 2015).

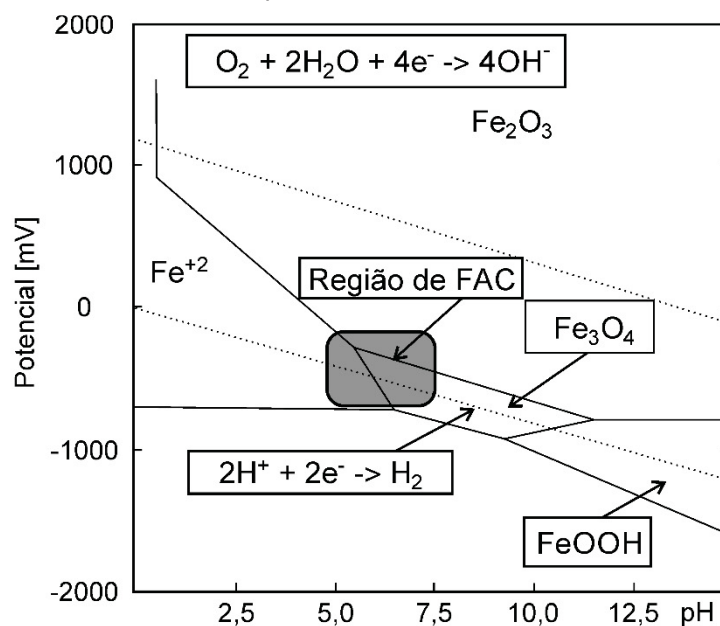
FIGURA 11 – SOLUBILIDADE DOS ÍONS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO PH



FONTE: Adaptada de Poulson (2014)

O comportamento geral da corrosão do aço carbono em meio aquoso pode ser previsto usando diagramas de potencial-pH (ver FIGURA 12). Em água desoxigenada e alta temperatura, o potencial de aços carbono, segundo Remy e Bouchacourt (1992), é próximo daquela que corresponde a reação do hidrogênio:

- a) Na água alcalina, o filme termodinamicamente estável de magnetita (Fe_3O_4) é formada em uma ampla gama de valores de pH. Nestas condições, há dependência do agente alcalino, o parâmetro crítico é o pH ou a concentração de ferro no equilíbrio;
- b) Na ausência de tratamento de água o íon ferroso (Fe^{+2}) é termodinamicamente estável, em vez de magnetita. Neste caso, o modelo básico também pode ser aplicável. O valor do pH que deve ser levado em consideração é o pH local, na superfície do metal.

FIGURA 12 – DIAGRAMA POTENCIAL-pH DO SISTEMA Fe-H₂O A 150 °C E A REGIÃO DE FAC

FONTE: Adaptada de Remy e Bouchacourt (1992)

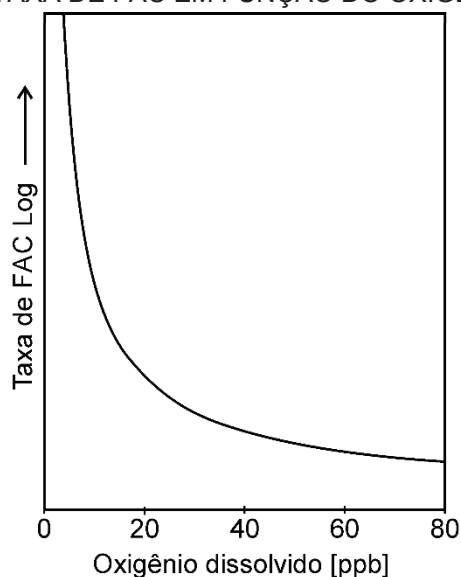
O diagrama de potencial-pH também é conhecido como diagrama de Pourbaix. A FIGURA 12 indica em qual pH e Potencial de Oxirredução (ORP), ver seção 2.1.3.8, em que a FAC é mais suscetível de ocorrer. O gráfico varia de acordo com a temperatura e concentração de íons de ferro no equilíbrio (BACZONI; COMPANY; ILLARIO, 2014).

2.1.3.7 Efeito do oxigênio

A taxa de FAC é inversamente afetada pelo teor de Oxigênio Dissolvido (DO) na água. A taxa de FAC diminui rapidamente quando a água contém mais de 20 partes por bilhão (ppb) de oxigênio (ver FIGURA 13), mas o nível exato de oxigênio necessário para prevenir a FAC depende de outros fatores, como o pH e a presença de contaminantes (ALLOY; PLANTS, 2014).

Em diretrizes gerais, considera-se que seja desejável uma quantidade de DO acima de 50 ppb, para reduzir a FAC (ver FIGURA 13). Algumas plantas adicionam oxigênio em sua água de alimentação (LISTER et al., 2009). Principais linhas de vapor feitas de aço carbono são suscetíveis à FAC, isso se deve na maioria das vezes por causa do oxigênio que, sendo um gás, permanece na fase de vapor e não se mistura com a fase líquida. Pela mesma razão, a injeção de oxigênio no vapor úmido não impedirá a FAC. A injeção de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) tem sido explorado como uma possível mitigação da FAC (ALLOY; PLANTS, 2014).

FIGURA 13 – TAXA DE FAC EM FUNÇÃO DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO



FONTE: Adaptada de Port (1998)

A camada de óxido protetor é uma composição de magnetita e hematita. Existe um efeito limiar, que pode ser entendido a partir do diagrama de potencial-pH (ver FIGURA 12) quando o nível de oxigênio aumenta, o ponto característico move-se para um potencial maior e a hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) é formada em vez de magnetita (Fe_3O_4). Como a solubilidade da hematita é muito menor que a da magnetita, a camada de óxido é muito mais resistente à FAC (REMY; BOUCHACOURT, 1992).

2.1.3.8 Efeito do Potencial de Oxirredução (ORP)

O Potencial de Oxirredução (ORP) indica a disponibilidade de elétrons livres e a tendência oxidante ou redutora da água. O ORP da água é medido em milivolts [mV] usando um eletrodo ORP. Valores medidos de ORP são frequentemente normalizados com o Eletrodo Padrão de Hidrogênio (SHE). Para converter medidas de ORP para SHE deve-se levar em conta o tipo de eletrodo utilizado e a temperatura, dado que esses afetam as reações de oxirredução (JAMES et al., 2004).

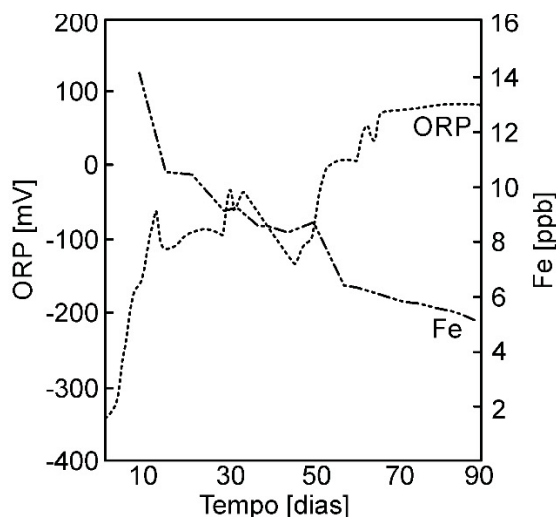
O potencial de oxirredução fornece uma indicação do equilíbrio entre agentes redutores e o oxigênio, podendo ser usado como um meio de controle da química da água de alimentação (HERBERT; OFFICER; STATION, 2010). O conhecimento do equilíbrio pode não ser suficiente para indicar a suscetibilidade à FAC. O ORP não é

uma medida do potencial de corrosão⁴, mas é um parâmetro excelente para determinar o potencial de corrosão relativo em um sistema de água de alimentação (DOOLEY et al., 1999). Estudos envolvendo os efeitos do oxigênio e dos agentes redutores (hidrazina) levaram ao uso do ORP como principal parâmetro de controle da química.

A influência dominante na FAC, em escoamentos monofásicos, é o ORP. Para os materiais de aço carbono operando sob redução da química da água, o óxido formado é a magnetita, e sua solubilidade é fortemente influenciada pelas condições de redução. Simplesmente alterando a água para um meio oxidante resultará na formação de óxido férrico (FeOOH – hematita hidratada – $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (DOOLEY, 2008). Isso reduz a solubilidade do óxido da superfície, como o que acontece, por exemplo, quando se adiciona oxigênio mudando o meio de redutor para oxidante.

Pode se observar na FIGURA 14 que a dissolução da magnetita na água redutora também é função do potencial, quanto menor o ORP maior será a quantidade de ferro na água (DOOLEY, 2006). Não somente o ORP controla o óxido que se formará na superfície do componente, mas à medida que o ORP se torna mais redutor, maior é a possibilidade de ocorrer a FAC.

FIGURA 14 – VARIAÇÃO DO ORP E DA QUANTIDADE DE Fe



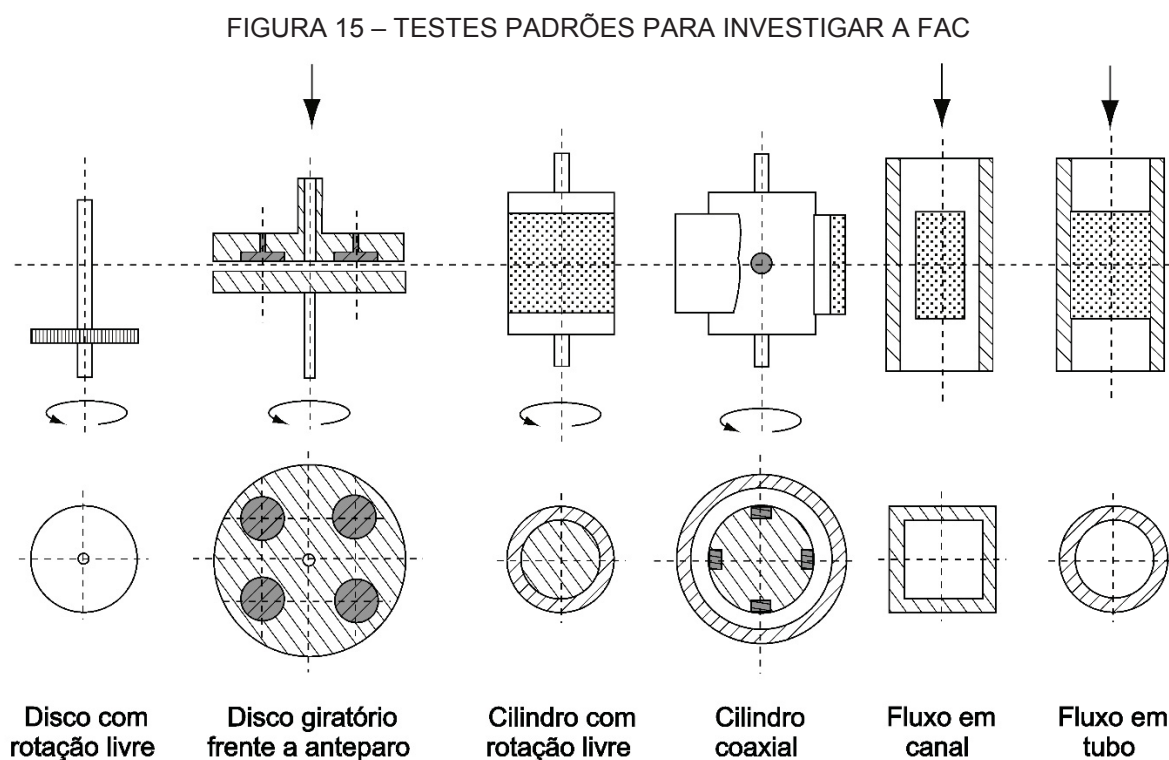
FONTE: Adaptada de Dooley (2006)

⁴ Potencial eletroquímico de corrosão é a diferença de tensão entre um metal imerso em um determinado ambiente e um eletrodo padrão de referência (SHE).

2.1.4 Testes de FAC

Há uma grande variedade de técnicas de laboratório que estão disponíveis para investigar a FAC. As técnicas de laboratório utilizadas incluem eletrodos rotativos; *jet impingement*; e tubos e canais.

As técnicas de eletrodos rotativos com simetria axial incluem o disco com rotação livre; o disco em frente a um anteparo; o cilindro com rotação livre; e o cilindro coaxial. A FIGURA 15 representa as ferramentas padronizadas para investigar a FAC, como apresentado na Norma DIN 50920 (1985). Outra configuração de eletrodos rotativos é o *rotated gage*, que contém cupons de perda de massa dispostos entre os suportes de tal forma que as superfícies externas, dos cupons, formam partes de um cilindro rotativo.



FONTE: Adaptada de Schmitt e Bakalli (2010)

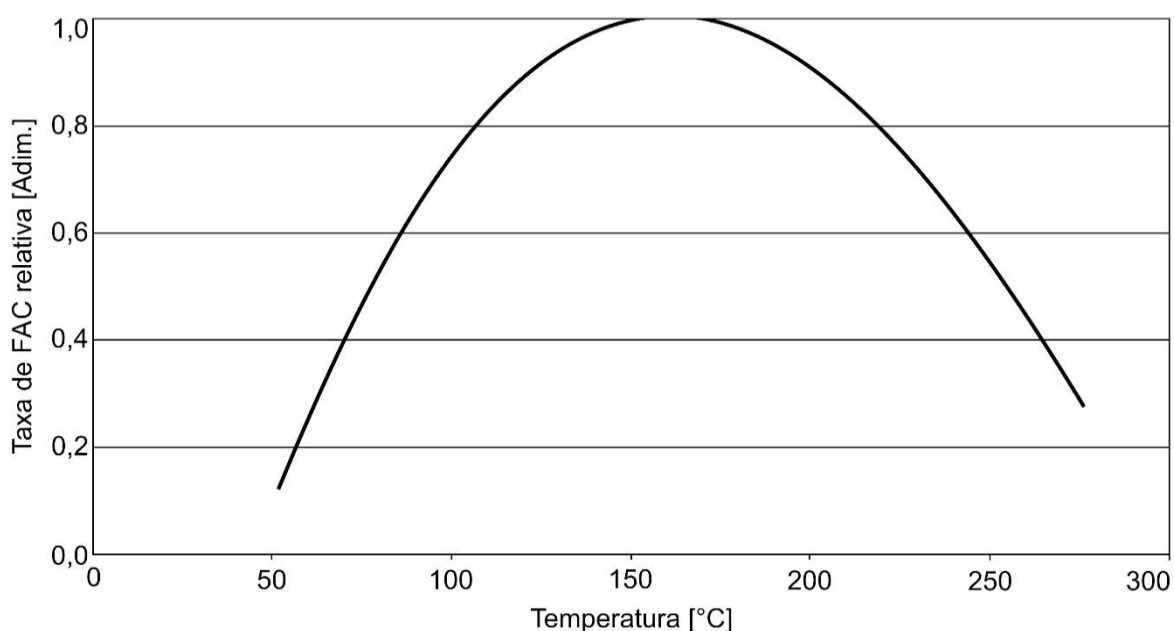
O tipo de escoamento predominantemente na indústria faz-se por meio de tubulações. Portanto, os estudos de escoamento com tubos/dutos e canais são realizados nos casos em que é necessária uma correlação direta com situações reais. As experiências em tubos/canais são classificadas como as mais relacionadas às condições de serviço e mais preditivas. Isso se deve ao fato que o padrão de escoamento em tubos e canais é similar aos encontrados nas plantas e são bem representados

pelas equações de transferência de massa, calor e momento. No laboratório, os experimentos em tubos e canais são geralmente realizados em circuitos fechados (SCHMITT; BAKALLI, 2010).

2.1.5 FAC em baixa temperatura

Os danos causados pela FAC são normalmente encontrados entre as temperaturas de 90 a 230 °C (FIGURA 16). No entanto, danos nos componentes em

FIGURA 16 – DEPENDÊNCIA DA TAXA DE FAC EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA



FONTE: Adaptada de Machiels e Crockett (2006)

temperaturas operacionais mais altas e, ocasionalmente, menores foram relatados. Ao longo dos anos, houveram relatos dispersos da FAC em baixas temperaturas (temperaturas menores que 90 °C) e em alguns casos com taxas de FAC superior à prevista. Nesses casos, o dano exigiu reparo e/ou substituição do componente (DOOLEY et al., 2009; MACHIELSS; CROCKETT, 2007).

Em baixas temperaturas o filme de magnetita na interface metal/óxido é muito fino e os íons de Fe^{2+} são facilmente transportados da superfície do metal para a interface do óxido/água através da camada porosa da magnetita. A elevação do pH da água contribui para a uma transformação relativamente lenta da magnetita (DOOLEY, 2006). Mas se as condições favorecem a transferência de massa, como no caso de alta velocidade do escoamento, a perda de espessura pode ser muito rápida, mesmo em baixas temperaturas (KAIN, 2014).

Há também relatos de ocorrência da FAC em baixa temperatura (na qual, segundo a análise do parâmetro temperatura, não haveria grande suscetibilidade para a sua ocorrência) em usinas nucleares, nos Reatores de Água Pressurizada (PWR) e nos Reatores de Água em Ebulição (BWR) (MACHIELS; CROCKETT, 2006). Assim como Crockett e Horowitz (2009) relataram em seu trabalho a ocorrência de FAC em baixas temperaturas, em diferentes tipos de reatores. Normalmente, isso ocorre na tubulação entre o processo de purificação/desmineralização da água até o ponto em que há a adição do produto controlador do pH.

Crockett e Horowitz (2009) em seu trabalho relataram problemas de FAC em alguns sistemas que operavam com água desoxigenada, pH neutro e temperatura aproximada de 50 °C. Levando em consideração somente a temperatura, a taxa de FAC diminui com a sua redução e a razão entre as taxas de FAC a 50 °C e a 150 °C é aproximadamente um sétimo a um sexto. Mas levando em consideração a temperatura e o pH, a taxa de FAC a 50 °C com pH 7,0 é aproximadamente igual ou superior a de 150 °C com pH 9,2 o que significa que a susceptibilidade à FAC do equipamento é comparável (YONEDA et al., 2016).

Dados em artigos sobre a FAC em baixas temperaturas raramente são encontrados. Devido a esta dificuldade, Yoneda et al. (2016) desenvolveram um experimento, sendo esse um circuito fechado no qual se produzia turbulência sobre uma superfície, devido a um anteparo na forma de degrau posicionada antes da área a ser avaliada. Foram utilizados corpos de provas de aço carbono, conseguindo obter dados em condições de temperatura relativamente baixa (50 °C), o que dificilmente é encontrado em estudos anteriores. Embora a suscetibilidade à FAC em tubulações mesmo em baixas temperaturas seja apontada como um dos itens que se deve tomar cuidado no gerenciamento da planta, há essa escassez de resultados (YONEDA et al., 2016).

Contudo, Al-Othmany (2013) propôs um ensaio em baixa temperatura (90 °C). Chegando ao resultado de que não havia nenhuma evidência de FAC na superfície de teste e que não havia sido medida nenhuma perda significativa de espessura. Sendo assim, o autor concluiu que não havia a necessidade de mais estudos da FAC em temperaturas menores que 90 °C.

Faz-se necessário ressaltar que as condições do experimento de Al-Othmany (2013) levou em consideração a mudança temperatura para 90 °C, mantendo o pH em 9,2 e a velocidade do fluido utilizada no ensaio foi relativamente baixa (1,34 m·s⁻¹).

Como já apresentado a FAC é composta por diversas variáveis que atuam simultaneamente, com a alteração somente de um parâmetro o que se pode afirmar é que para aquela temperatura, pH e coeficiente de transferência de massa não há FAC, mas não se pode generalizar para outros casos. Como constatado com o trabalho de Yoneda et al. (2016), mencionado anteriormente, foi testado à suscetibilidade a FAC, trabalhando-se com intervalos de temperatura de 50 a 150 °C, do pH de 7,0 a 9,2 e velocidades do escoamento de 4,5 a 10,0 m·s⁻¹. Sendo assim, faz-se necessária uma maior compreensão do comportamento/suscetibilidade da FAC em baixas temperaturas.

2.2 TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DA CORROSÃO

O monitoramento da corrosão é complexo devido às variedades de aplicações e parâmetros da corrosão (QUADRO 2) (NACE, 1999). Segundo NACE (1999), existe

QUADRO 2 – TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE CORROSÃO

Direta	Intrusiva	Física	Cupons de perda de massa
			Resistência Elétrica
			Exame Visual
		Eletroquímica AC	Resistência de polarização linear
			Amperímetro de resistência zero
			Potenciostato/Galvanostato
		Eletroquímica DC	Ruído eletroquímico
	Espectroscopia de impedância eletroquímica		
	Análise de distorção harmônica		
	Não Intrusiva	Física	Ultrassom
<i>Magnetic flux leakage</i>			
Eletromagnética			
Raios-X			
Emissão Acústica			

Indireta	On-line (Tempo real)	Produtos da corrosão	Monitoramento de Hidrogênio
		Eletroquímica	Potencial de corrosão
		Química da água	pH
			Condutividade
			Oxigênio dissolvido
		Detecção de fluido	Potencial de Oxirredução
			Regime do escoamento
			Velocidade do escoamento
		Parâmetros do processo	Pressão
	Temperatura		
	Ponto de orvalho		
	Deposição	Fator de encrustamento	
	Externo	Termografia	
	Off-line (Análise de amostras)	Parâmetros da água	Alcalinidade
			Análise de íons metálicos
Concentração de sólidos dissolvidos			
Análise de gás			
Inibidor residual		Análise microbiológica	
		Inibidores do filme de corrosão	

FONTE: Adaptado Roberge (2007)

uma grande variedade de técnicas disponíveis, mas cada uma possui seus pontos positivos e negativos. Sendo assim, é comum a utilização simultânea de mais de uma técnica para que os pontos negativos de uma sejam compensados pelos pontos positivos de outra

Existe várias maneiras de agrupar/dividir as diversas técnicas de medição de corrosão, uma das formas mais utilizada é apresentada no QUADRO 2. Este quadro também apresenta as técnicas aplicadas no desenvolvimento desse trabalho, as em negrito do lado direito. E a seguir algumas destas técnicas serão apresentadas.

2.2.1 Exame Visual (EV)

O exame visual é o método mais comum e antigo usado na inspeção da corrosão (ROBERGE, 2007). Geralmente é a primeira etapa a ser realizada na verificação de componentes, podendo ser um modo rápido e econômico para se detectar vários tipos de danos antes da falha.

O princípio físico, por trás do exame visual, é a emissão de luz visível na superfície e esta será refletida, revelando algumas de suas características. Ao inspecionar a aparência de um componente, pode-se inferir sua condição (ROBERGE, 2007).

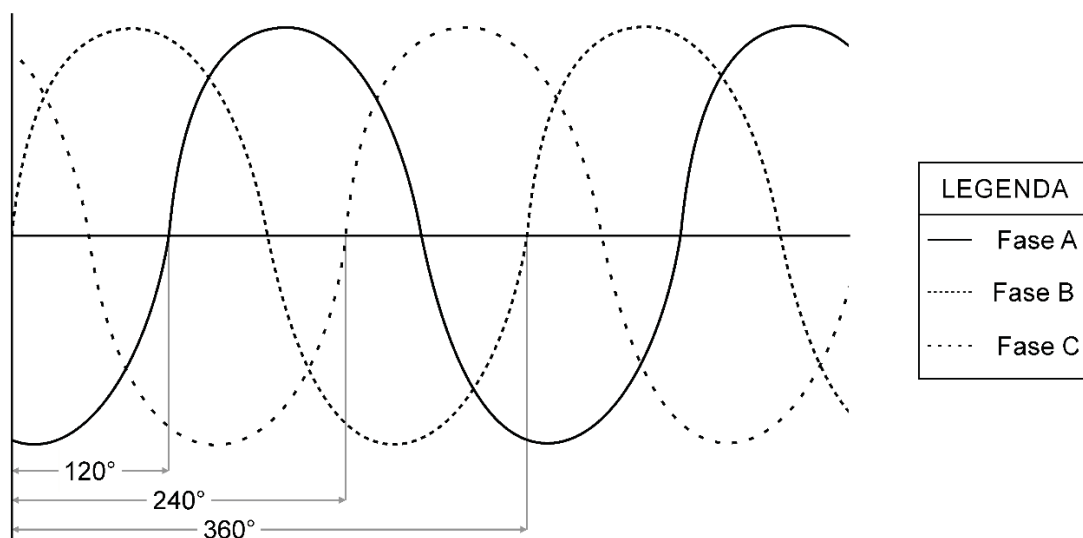
A desvantagem é que a superfície deve estar relativamente limpa e acessível. Essa técnica só pode detectar defeitos superficiais. Normalmente, a inspeção visual não possui a sensibilidade de outros ensaios não destrutivos superficiais. Técnicas de inspeção visual podem adicionalmente ser trabalhosas e monótonas, levando a erros (ROBERGE, 2007). Geralmente não podem ser aplicadas com o sistema em funcionamento (NACE, 1999).

2.2.1.1 Medição de Fase 3D (3DPM)

Esta técnica de medição se baseia na interferometria óptica, realizando a análise dos padrões de interferência criada pela sobreposição de três ondas defasadas em cento e vinte graus (FIGURA 17).

A interferometria combina ondas separadas de maneira que o resultado da sua combinação tenha alguma característica significativa. O funcionamento, de forma geral, pode ser descrito como a combinação de ondas com frequência iguais, sendo o padrão resultante determinado pela diferença de fase entre elas. Nas ondas em fase

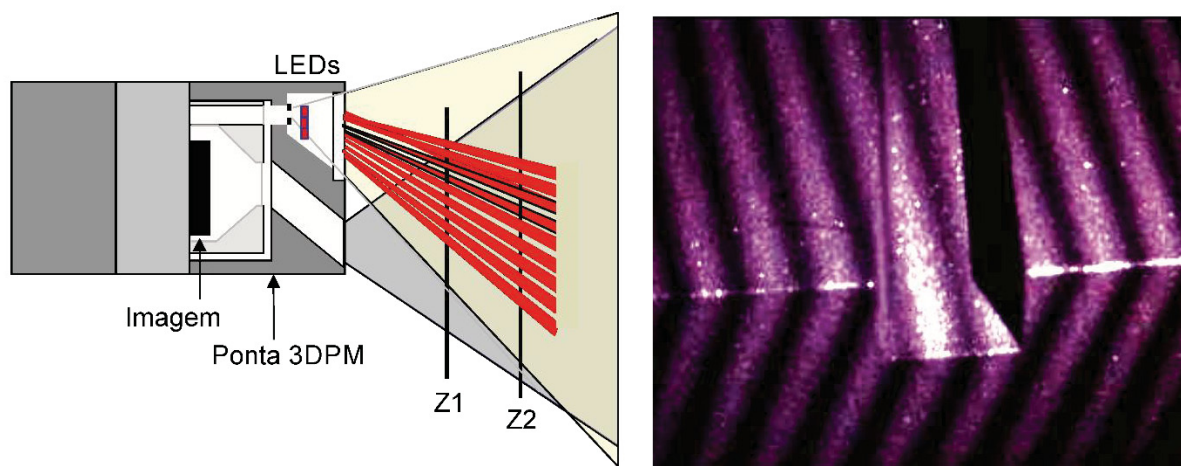
FIGURA 17 – DIFERENÇA DE FASE DAS ONDAS



FONTE: O autor (2019)

há uma interferência construtiva, entretanto, nas ondas defasadas a interferência é destrutiva (GONÇALVES, 2010). Como é possível notar o padrão das franjas construídas com cento e vinte graus de diferença de fase e onda senoidal (FIGURA 18).

FIGURA 18 – FUNCIONAMENTO DA PONTEIRA E O PADRÃO DAS FRANJAS PRODUZIDO PELO LED EM UMA SUPERFÍCIE



FONTE: Adaptada de Britton (2015)

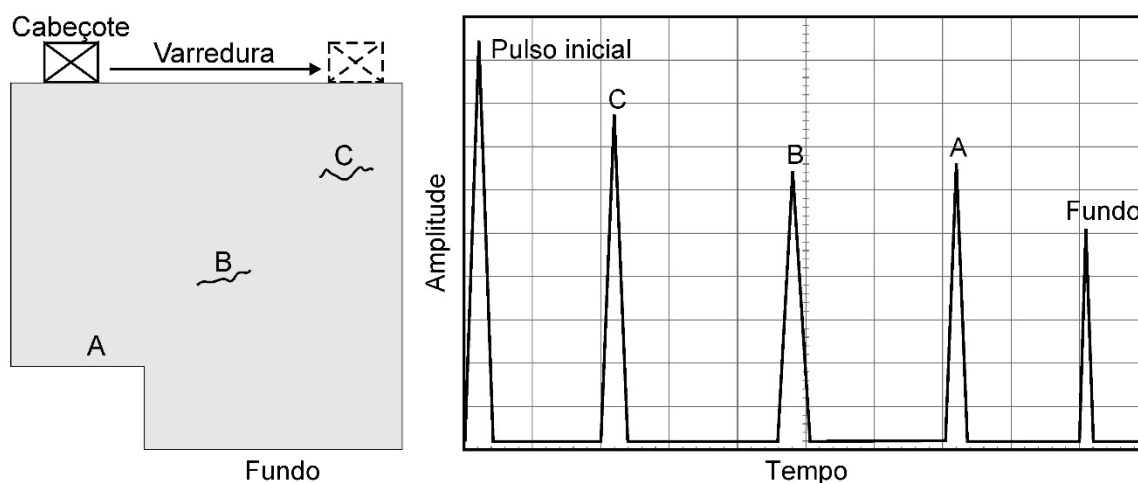
Padrões de ondas são projetados usando dois conjuntos de Diodos Emissores de Luz (LEDs) em cada lado da ótica de visualização e a distância do objeto em cada ponto é calculada usando trajetórias de padrão (triangulação) conhecida da calibração.

2.2.2 Ultrassom (US)

A técnica de Ultrassom (US) é um dos ensaios não destrutivos mais utilizado, é aplicado para medir uma variedade de condições, características do material, para controle de qualidade e inspeção em todas as principais indústrias. A disponibilidade de equipamentos compactos tornou esse método uma técnica muito utilizada para aplicações de campo (KALYANASUNDARAM; MUKHOPADHYAY; RAO, 2007; ROBERGE, 2007).

Do mesmo modo que uma onda sonora reflete ao incidir em um anteparo, a onda ultrassônica, ao percorrer um meio elástico, podendo ser um metal, polímero, concreto, refletirá da mesma forma, ao incidir em alguma falha interna neste meio considerado (FIGURA 19). Através de aparelhos especiais, podem-se detectar as reflexões provenientes do interior da peça examinada, sendo possível, com isso, localizar e interpretar as discontinuidades (ANDREUCCI, 2014).

FIGURA 19 – INSPEÇÃO POR ULTRASSOM



FONTE: Adaptada de Roberge (2007)

O método consiste em medir o tempo que leva para o sinal retornar e a quantidade e a forma desse sinal. Para o componente inspecionado na FIGURA 19, tem-se o pulso inicial gerado pelo transdutor próximo de zero e conforme a varredura ocorre ao longo da superfície, quatro outros sinais aparecem em diferentes tempos na tela (ROBERGE, 2007).

A vantagem é que o monitoramento de corrosão pode ser realizado sem a instalação de qualquer dispositivo no componente que está sendo monitorado e como as áreas corroídas do componente são medidas diretamente, técnicas analíticas podem ser usadas para determinar a integridade (NACE, 1999).

As limitações da técnica são que a precisão dos dados de monitoramento de corrosão e a sensibilidade a pequenas mudanças de perda de material não são tão altas quanto outras técnicas; uma maior precisão, para fins de monitoramento, é limitada por variações de temperatura na base e da velocidade do som em diferentes metais; essa técnica é normalmente usada para previsão de corrosão por períodos de tempo mais longos (NACE, 1999).

3 MODELOS MATEMÁTICOS

Vários modelos foram propostos ao longo do tempo para descrever a FAC, tanto teóricos como empíricos. Os modelos teóricos estabelecem um conjunto de equações interrelacionadas descrevendo os processos físicos que ocorrem em locais específicos dentro de um sistema proposto. Os modelos empíricos são baseados em ajustes estatísticos de acordo com as tendências dos dados obtidos em laboratório, e são modificados apropriadamente para combinar com os dados obtidos da planta.

Embora os modelos teóricos permitam o investigador a incorporar todos os mecanismos relevantes, eles podem produzir um conjunto de equações complexas e difíceis de serem resolvidas em um intervalo de tempo razoável. No início do desenvolvimento do modelo, os modelos teóricos fornecem uma visão dos fenômenos e direção dos experimentos (KIM et al., 1998).

Embora os modelos empíricos possam ser bem relacionados com os dados, a extrapolação de tendências para o espaço de funções completo pode não ser precisa. Por exemplo, o efeito da velocidade em baixo e alto pH pode ser muito diferente devido a mudanças na estabilidade do filme de óxido. As abordagens estatísticas baseadas nos dados, no entanto, fornecem um produto final mais utilizável para a indústria (KIM et al., 1998).

Levando em consideração diversos trabalhos publicados que apresentam modelos para a predição da FAC foi construído o QUADRO 3. Este quadro relaciona quais variáveis estão presentes nos modelos de forma direta (X) ou implícita (X'). Os modelos foram agrupados/divididos em modelos teóricos e empíricos.

Para proceder na escolha de qual modelo matemático seria utilizado para prever a FAC, neste trabalho, foi estabelecida a premissa de se escolher dois modelos, sendo um teórico e outro empírico. Os modelos foram escolhidos após a análise individual dos grupos teóricos e empíricos, através de matrizes de escolha, nas quais foram avaliadas a quantidade e qualidade das variáveis abrangidas por cada modelo, assim como a disponibilização do valor das constantes dos modelos (os modelos Berge e Saint Paul, da EDF (*Électricité de France*) e de Chexal-Horowitz não informavam estes valores).

QUADRO 3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS MATEMÁTICOS

ITENS DE COMPARAÇÃO	MODELOS TEÓRICOS					MODELOS EMPÍRICOS			
	Simples	B&SP ¹	CEGB	EDF	S-C ²	Keller	Kastner	Siemens	C&H ³
Concentração de íons em equilíbrio		X		X	X				
Concentração de íons óxido/água	X		X						
Concentração de íons no escoamento distante	X	X	X						
Taxa de reação		X		X	X				
Coeficiente de difusão	X ⁱ	X ⁱ	X ⁱ	X ⁱ	X				
Espessura óxido					X				
Porosidade do óxido				X	X				
Temperatura	X ⁱ	X ⁱ	X ⁱ	X	X ⁱ	X	X	X	X
pH	X ⁱ	X ⁱ	X ⁱ	X ⁱ	X ⁱ		X	X	X
Teor de oxigênio							X	X	X
Título do vapor						X	X ⁱⁱ	X ⁱⁱ	X
Coeficiente trans. massa	X		X	X	X				X
Geometria	X ⁱ		X ⁱ	X ⁱ	X ⁱ	X	X	X	X
Velocidade	X ⁱ		X ⁱ	X ⁱ	X ⁱ	X	X	X	X ⁱ
Composição do material				X	X ⁱ		X	X	X
Diâmetro do tubo	X ⁱ		X ⁱ	X ⁱ	X ⁱ				X ⁱ
Tempo							X	X	

FONTE: O autor (2019)

LEGENDA: 1 - Berge e Saint Paul; 2 - Sanchez-Caldera; 3 – Chexal e Horowitz

Xⁱ – Está no modelo de forma implícita;Xⁱⁱ – Equações distintas para escoamentos monofásico e bifásico.

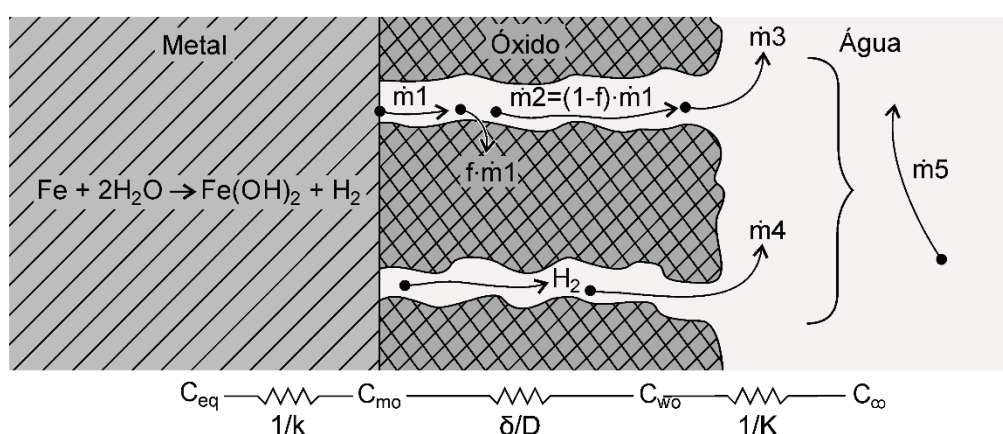
Tendo como base a premissa de se escolher dois modelos, sendo um teórico e outro empírico, e as matrizes de escolha, como mencionado anteriormente, foram escolhidos o modelo teórico de Sanchez-Caldera e o modelo empírico de Kastner (optou-se pelo modelo Kastner ao invés o modelo da Siemens, pois este é uma adaptação daquele). Ambos os modelos escolhidos são melhores descritos na sequência dessa seção.

3.1 MODELO SANCHEZ-CALDERA

O modelo Sanchez-Caldera, segundo Han, Peng e Li (2014), é um modelo de predição amplamente utilizado. Embora seja um modelo simples, ele pode ser usado para explicar os fenômenos mais importantes da FAC.

A FIGURA 20 mostra um esquema do modelo. A FAC é modelada como uma série de processos de transferência de massa, através de “resistências” do processo de transferência, conforme pode ser visualizado no diagrama "circuito" na parte inferior da FIGURA 20 (KIM et al., 1998).

FIGURA 20 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO MODELO DE SANCHEZ-CALDERA



FONTE: Adaptada de Kim et al. (1998) e Sanchez-Caldera (1984)

O método utiliza o seguinte equacionamento:

$$\dot{m} = \frac{C_{eq} \cdot \theta}{\left[\frac{1}{k} + (1-f) \cdot \left(\frac{\delta}{D} + \frac{1}{K} \right) \right]} \quad (11)$$

sendo que \dot{m} é a taxa de desgaste; C_{eq} é a concentração dos íons solúveis de ferro em equilíbrio; θ é a porosidade; K é o coeficiente de transferência de massa; k é a constante da taxa de reação; f é a fração de metal oxidado convertido em magnetita na interface metal-óxido (constante, com valor de 0,5); D é o coeficiente de difusão dos íons de ferro na água; δ é a espessura do óxido.

Para calcular a taxa de FAC os parâmetros de taxa de reação (k), coeficiente de transferência de massa (K), difusão dos íons na água (D) e a concentração dos íons de ferro (C_{eq}) podem ser aproximadamente estimados.

A constante da taxa de reação (k) é obtida por

$$k = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \quad (12)$$

sendo que, segundo Zhu et al. (2014), $A = 2,348 \cdot 10^{14} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $E = -17788 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$; R é a constante universal dos gases igual a $8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; e T é a temperatura em Kelvin.

Segundo Trevin (2012), para determinar o coeficiente de transferência de massa (K), é conveniente, usar as analogias de Chilton-Colburn para a transferência de massa, calor e momento de um líquido em uma superfície sólida:

$$\text{Sh} = K \cdot \frac{d}{D} = \alpha \cdot \text{Re}^\beta \cdot \text{Sc}^\gamma \quad (13)$$

sendo que Sh é o número adimensional de Sherwood; d é o diâmetro interno do tubo [m]; D é a difusividade; Re é o número adimensional de Reynolds; Sc é o número adimensional de Schmitt; e α , β e γ , segundo Bignold et al. (1983), para seções de tubo reto são iguais a 0,0165, 0,86 e 0,33, respectivamente.

O coeficiente de transferência de massa (K) pode ser obtido reorganizando a equação (13), ficando

$$K = \alpha \cdot \text{Re}^\beta \cdot \text{Sc}^\gamma \cdot \frac{D}{d} \quad (14)$$

onde os valores de Reynolds e Schmitt são dados por:

$$\text{Re} = \frac{\rho_f \cdot V \cdot d}{\mu} = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (15)$$

$$\text{Sc} = \frac{\nu}{D} \quad (16)$$

em que V é a velocidade do fluido [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]; ρ_f é a massa específica do fluido [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; μ é a viscosidade dinâmica [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]; e ν a viscosidade cinemática [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

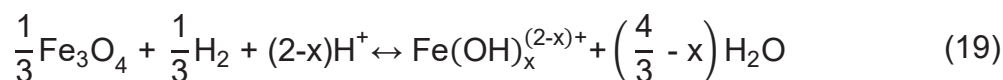
Já a difusão pode ser obtida por

$$D = 2,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{T}{\mu} \quad (17)$$

sendo que T é a temperatura em Kelvin; e μ é a viscosidade dinâmica [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$], que pode ser obtida em função da temperatura (t) em Celsius

$$\mu = 0,00179 \cdot (1 + 0,03368 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2)^{-1} \quad (18)$$

A magnetita (Fe_3O_4) dissolve na água e a reação química é representada por



em que $\text{Fe}(\text{OH})_x^{(2-x)+}$ representa os diferentes tipos de óxidos do ferro; e x assume valores de zero a três (SWEETON; BAES, 1970). As constantes de equilíbrio da equação acima são K_0 , K_1 , K_2 e K_3 , respectivamente. Sendo K_x , representada pela seguinte equação:

$$K_x = \frac{\text{Fe}(\text{OH})_x^{(2-x)+}}{[\text{H}^+]^{(2-x)} \cdot [\text{H}_2]^{1/3}} \quad (20)$$

A constante de equilíbrio é calculada por

$$\ln K_x = -\frac{A_0}{R \cdot T} + \frac{A_1}{R} \cdot [\ln(T) - 1] + \frac{A_2}{R} \quad (21)$$

os valores dos parâmetros A_0 , A_1 e A_2 estão listados na TABELA 1.

TABELA 1 – VALOR DOS PARÂMETROS A_0 , A_1 e A_2

PRODUTO DA CORROSÃO	A_0 [J·mol ⁻¹]	A_1 [J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹]	A_2 [J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹]
Fe^{2+}	-112449	41	-340
FeOH^+	-49091	14	-179
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	19309	0	-99
$\text{Fe}(\text{OH})_3^-$	37844	0	-207

FONTE: Adaptada de Han, Peng e Li (2014)

A concentração de íons de ferro (C_{eq}), segundo Han, Peng e Li (2014) e Zhu et al. (2014), é calculado por

$$C_{\text{eq}} = [\text{Fe}^{2+}] + [\text{FeOH}^+] + [\text{Fe}(\text{OH})_2] + [\text{Fe}(\text{OH})_3^-] \quad (22)$$

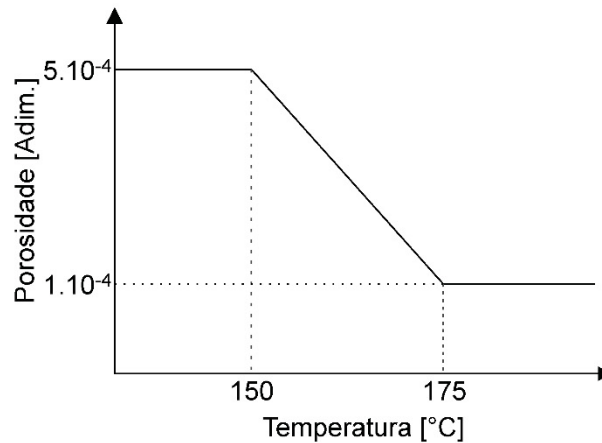
$$C_{\text{eq}} = \{K_0 \cdot [\text{H}^+]^2 + K_1 \cdot [\text{H}^+] + K_2 + K_3 \cdot [\text{H}^+]^{-1}\} \cdot [\text{H}_2]^{1/3} \quad (23)$$

$$C_{\text{eq}} = \{K_0 \cdot 10^{-2 \cdot \text{pH}} + K_1 \cdot 10^{-\text{pH}} + K_2 + K_3 \cdot 10^{\text{pH}}\} \cdot [\text{H}_2]^{1/3} \quad (24)$$

A concentração de H_2 , segundo Remy e Bouchacourt (1992), varia no intervalo de $0,78 \cdot 10^{-3}$ a $3,25 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Para o cálculo da porosidade do óxido (θ) será assumido o mesmo descrito por Sanchez-Caldera (1984) na sua tese, na qual a porosidade variava com a temperatura, como está representado na FIGURA 21.

FIGURA 21 – VARIAÇÃO DA POROSIDADE COM A TEMPERATURA



FONTE: Adaptada de Sanchez-Caldera (1984)

A espessura da camada de óxido pode ser determinada, segundo Han, Peng e Li (2014), utilizando a constante de taxa de corrosão parabólica. Na qual a espessura da camada de óxido no estado de equilíbrio, considerando um aço carbono em meio aquoso, pode ser expressa como:

$$\delta = \frac{k_p \cdot \rho_{Fe}}{2 \cdot K \cdot C_{eq} \cdot M_{Fe}} \quad (25)$$

$$\log k_p = \frac{-2701}{t} - 14,33 \quad (26)$$

sendo que k_p representa a constante da taxa de corrosão parabólica [$m^2 \cdot s^{-1}$]; ρ_{Fe} é a densidade do ferro [$\sim 7,87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$]; e M_{Fe} é a massa molar do ferro [$\sim 55,8 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$]. A equação (25) pode ser utilizada para valores de pH entre 5 a 12 e temperatura menor que 350 °C.

3.2 MODELO KASTNER

O modelo empírico de Kastner, segundo Huijbregts (2018), foi desenvolvido com base na degradação mais precoce dos equipamentos. As fórmulas do modelo para o escoamento monofásico estão mencionadas a seguir:

$$FAC_{taxa} = 6,25 \cdot Kc \cdot \{B \cdot e^{N \cdot V} \cdot [1 - 0,175 \cdot (pH - 7)^2] \cdot 1,8 \cdot e^{-0,118 \cdot g} + 1\} \cdot F(\tau) \quad (27)$$

sendo que B, N e $F(\tau)$ são obtidos por:

$$B = -10,5 \cdot \sqrt{h} - (9,375 \cdot 10^{-4} \cdot T^2) + 0,79 \cdot T - 132,5 \quad (28)$$

$$N = -0,0875 \cdot h - (1,275 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) + (1,078 \cdot 10^{-2} \cdot T) - 2,15 \quad (h < 0,5) \quad (29)$$

$$N = (-1,29 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0,109 \cdot T - 22,07) \cdot 0,154 \cdot e^{-1,2 \cdot h} \quad (0,5 < h < 5,0) \quad (30)$$

$$F(\tau) = 0,9999934 - 3,356901 \cdot 10^{-7} \cdot \tau - 5,624812 \cdot 10^{-11} \cdot \tau^2 + 3,849972 \cdot 10^{-16} \cdot \tau^3 \quad (31)$$

a equação (29) é usada para o teor de cromo e molibdênio somados inferior a 0,5 % e a equação (30) é utilizada para o teor entre 0,5 a 5 %.

O QUADRO 4 descreve as variáveis do modelo, suas devidas unidades e limitações para a aplicação do equacionamento.

QUADRO 4 – VARIÁVEIS CONSIDERADAS NO MODELO DE KASTNER

NOTAÇÃO	DESCRIÇÃO	DIMENSÃO	COMENTÁRIOS
FAC_{taxa}	Perda de material	$\mu g \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$	Fator de conversão de $\mu g \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ para $mm \cdot ano^{-1}$ é 0,01123
V	Velocidade de escoamento	$m \cdot s^{-1}$	---
T	Temperatura do fluido	K	$T < 613$
pH	pH	$-\log(H^+)$	$7,00 < pH < 9,39$
g	Oxigênio dissolvido	$\mu g \cdot kg^{-1}$	$0 < g < 30$
Kc	Fator geométrico	Adimensional	---
τ	Exposição	hora	$\tau > 200$ horas
h	Fator material	%	$0,0 < h < 5,0$

FONTE: Adaptado de Huijbregts (2018)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e os métodos utilizados estão divididos em quatro partes descritas a seguir.

Na primeira parte deste capítulo é apresentada a metodologia de ensaio usada. Em seguida, na segunda, é apresentado o material utilizado nos ensaios como o corpo de prova e suas características.

A terceira parte está relacionada com o projeto da bancada geradora de FAC, dimensionamento, seleção dos componentes, a construção e aquisição de dados.

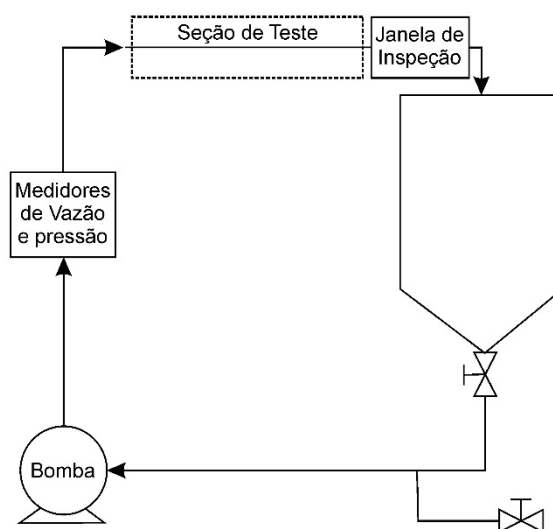
A quarta parte contém os procedimentos experimentais utilizados durante a execução dos ensaios.

4.1 METODOLOGIA DE ENSAIO

Como previsto no escopo desse trabalho, foi investigado a ocorrência de FAC em baixa temperatura, como já foi mencionado. Em temperaturas menores a suscetibilidade de ocorrência da FAC é menor, por isso será utilizadas condições que possibilite a ocorrência da FAC, como apresentado na seção 2.1.5.

Após o levantamento teórico, pôde-se definir o método a ser utilizado nos ensaios para a geração da FAC. Sendo assim, escolheu-se o sistema de circuito fechado (FIGURA 22). Nele um fluido com determinadas características iniciais e/ou controladas circula por uma seção de teste.

FIGURA 22 – ESQUEMA DA BANCADA GERADORA DE FAC



FONTE: O autor (2019)

Como descrito na seção 2.1.4, é predominantemente, na indústria, o escoamento por meio de tubulações. Realizando experimentos desse tipo é possível verificar uma correlação mais direta com situações do escoamento real, sendo classificados como os mais relacionados às condições de serviço e mais preditivos.

4.2 MATERIAL

Nesta seção serão apresentadas as características do material utilizado na seção de testes durante os experimentos.

Esta seção está dividida em duas partes, a primeira apresenta as características geométricas do corpo de prova e a outra mostra a composição química do material.

4.2.1 Corpo de prova

A seção de testes foi concebida com o intuito de reproduzir diferentes condições de fluxos. Sendo assim, foi previsto um comprimento ideal para poder avaliar o efeito da região de entrada do fluido, mais suscetível à FAC, assim como a possível ocorrência da FAC quando o escoamento está em desenvolvimento e completamente desenvolvido.

Para os ensaios utilizou-se na seção de teste um tubo e seção transversal circular com o diâmetro, usualmente, encontrado nos evaporadores de termelétricas. O tubo, para trocador de calor, com diâmetro externo de 1 ½" (38,10 mm) e espessura de 3,00 mm.

Para definir o comprimento da seção de testes foi calculado o comprimento necessário para o fluido estar completamente desenvolvido. Primeiramente foi necessário constatar se o fluxo seria laminar ou turbulento através do cálculo do número de Reynolds, equação (15). Utilizando a velocidade mínima para os ensaios de 5,00 m·s⁻¹ mantendo assim o escoamento sempre turbulento ($Re > 4000$) (SCHMITT; BAKALLI, 2010).

A partir disso, foi avaliado o comprimento necessário de tubo para o fluido estar completamente desenvolvido, sabendo-se que se trata de um escoamento turbulento, utilizou-se a seguinte equação:

$$L_M = [4,4 \cdot (Re)^{1/6}] \cdot d \quad (32)$$

Considerando a situação de maior velocidade de escoamento previsto, para os ensaios de $10,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, fez-se necessário que comprimento da seção de teste tivesse aproximadamente 90,0 cm, para o fluido estar completamente desenvolvido, assim sendo adotou-se o comprimento de um metro. Verificou-se que na velocidade, aproximada, de $12,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ o fluido começava a cavitatar, por isso foi considerado a velocidade máxima do escoamento de $10,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, menor que a velocidade limite para o fluido alcançar a tensão de cisalhamento crítica e dar início ao desgaste pelo processo erosivo e o escoamento se manteve em regime turbulento ao longo de toda a seção de testes.

4.2.2 Composição química

O material utilizado na seção de teste foi um aço carbono, já que este material é mais suscetível à FAC. E é recomendado, segundo ASM Handbook - Volume 1 (1990), para o uso em tubulações com altas pressões pelas normas ASTM, API e CSA.

O tubo utilizado segue a norma ABNT NBR 6591 (2008) e o material dele segue a norma da SAE1020, a qual determina os percentuais dos seus elementos constituintes de acordo com o informado na TABELA 2.

TABELA 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA

ABNT/SAE/AISI ⁽¹⁾	C	Mn	P máx.	S máx.	Si
1020	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,050	---

FONTE: Adaptada de SAE J403 (2001)

⁽¹⁾ As normas da ABNT, SAE e AISI, são equivalentes para a composição desse material.

Também foi realizada a análise metalográfica e de microdureza no material, os resultados dos ensaios se encontram no APÊNDICE A. O presente estudo não pretende avaliar o impacto da microestrutura no comportamento da corrosão, conforme descrita por Noël (2003), mas faz-se necessário deixar registrado para trabalhos/pesquisas futuras que tiverem esse objetivo, por este motivo as metalografias e microdurezas se encontram no apêndice.

4.3 FLUIDO UTILIZADO

Durante a realização dos testes foi utilizado água potável, que segundo a fornecedora atende os padrões do Anexo XX da Portaria de Consolidação número 5, de

28 de setembro de 2017 do Ministério Público de Saúde, para o controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano. Antes de ser utilizada a água foi fervida para realizar a retirada de elementos que poderiam acelerar o processo de transferência de massa como o oxigênio e o cloro.

4.4 PROJETO DA BANCADA GERADORA DE FAC

Vários circuitos fechados foram desenvolvidos para investigar como diferentes variáveis atuam na geração da FAC (AHMED; ABDUL ALEEM, 1994). A seleção de materiais utilizados no sistema como tubulações, bomba e outros componentes, em geral, foram selecionados para serem inertes ao experimento. Por isso, utilizam-se materiais como aço inox austenítico, Poli Cloreto de Vinila (PVC), Etileno-Propileno-Dieno (EPDM), Borracha Natural (NR), Viton® (borracha fluorcarbonatada) e outros. Evitando a degradação dos demais componentes durante os ensaios (WOOD, 2007). Também deve-se preocupar com o isolamento elétrico entre materiais de diferentes composições afim de se evitar a corrosão galvânica, por exemplo entre os parafusos, a janela de inspeção, (ver FIGURA 24) e outros. Anexo parece ter em apenas de um dos lados.

Para a realização do projeto primeiramente foram considerados o diâmetro interno da seção de teste e a velocidade máxima do escoamento ($10,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), ver o final da seção 4.2.1. Obtendo com isso a vazão mínima necessária para atingir a velocidade requerida, considerando também a perda de carga na tubulação, com um fator de segurança, foi realizado o dimensionamento da bomba ANEXO A.

Para a tubulação definiu-se como padrão de conexão a do tipo flange, possibilitando o desmonte e limpeza da tubulação após o termino de cada ensaio. O diâmetro da tubulação de sucção e recalque da bomba se mantiveram os mesmos da bomba, evitando, com isso, a realização de transição de seção ao longo da tubulação.

A possível ocorrência de cavitação do fluido no rotor da bomba foi verificada através do cálculo do NPSH (*Net Positive Suction Head*) disponível da instalação e do requerido da bomba, segundo o fabricante. O cálculo foi realizado utilizando a seguinte equação:

$$\text{NPSH}_D = H_A + H_S - H_{VP} - h_{\text{sucção}} \quad (33)$$

sendo que H_A é a pressão atmosférica; H_S é a altura estática; H_{VP} é a pressão de vapor, pressão em função da temperatura; $h_{sucção}$ é a perda devido ao atrito na tubulação de sucção. Como avaliado o $NPSH_D$ (da instalação) $>$ $NPSH_R$ (da bomba), ou seja, não haverá cavitação no rotor da bomba.

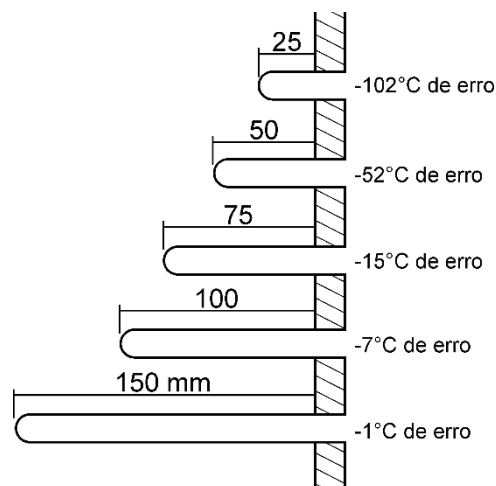
O fluido de trabalho foi definido como sendo monofásico (com a presença de material particulado, proveniente apenas do decorrer dos ensaios). O medidor de vazão somente pode ser dos tipos eletromagnético ou ultrassônico, por causa da presença de material particulado no fluido, não sendo aconselhável o uso de equipamentos com partes móveis devido ao desgaste dessas partes com o tempo.

Por último determinou-se o volume do reservatório, considerando como sendo cinco vezes o volume de fluido no interior da tubulação, ou seja, cento e vinte litros. O controle de temperatura e aquecimento do fluido foi realizado no reservatório.

Há uma janela de inspeção no final da seção de teste. Podendo, com isso, parar o ensaio um instante e inspecionar internamente, a seção de testes, com o boroscópio, se necessário.

O poço termométrico no reservatório foi selecionado analisado possíveis erros de medição, relativos à inserção inadequada, que poderiam ocorrer. A FIGURA 23 demonstra o erro de medição devido à condução de calor na parede de um forno a 160°C com o seu interior a 690°C . Sendo assim, foi optado por um poço termométrico com o comprimento de 100 mm, para a redução do erro devido à condução, mesmo com a diferença de temperatura do fluido e ambiente, sendo menor que o exemplificado.

FIGURA 23 – ERRO DEVIDO A CONDUÇÃO DE CALOR



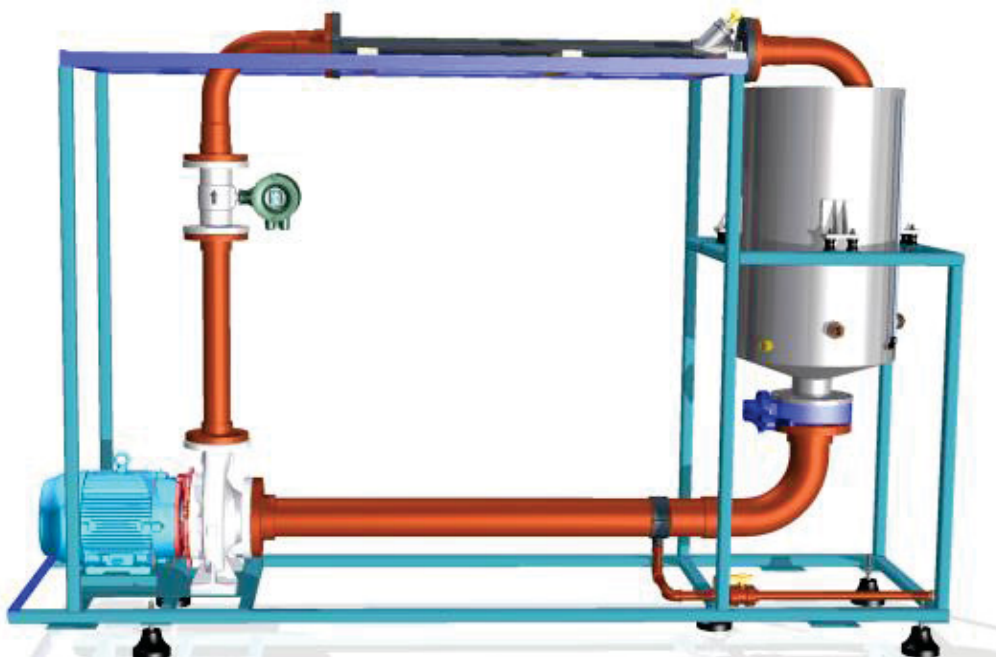
FONTE: Adaptada de Viana (1999)

Com a definição do circuito fechado foi desenvolvido a estrutura para realizar a integração dos componentes. Na FIGURA 24, pode-se observar um desenho do projeto da bancada geradora de FAC. Os componentes e a montagem podem ser mais bem visualizados com auxílio do APÊNDICE B.

A estrutura possui as seguintes dimensões: 2,50 m de comprimento, 0,63 m de largura e 1,50 m de altura. A seção de teste está posicionada na parte superior em

cinza da FIGURA 24 e no final da seção de testes, do lado direito, se localiza a janela de inspeção. A estrutura estará apoiada no solo por meio de sapatas de borrachas, que assim como a tubulação de PVC, os coxins do reservatório, o lençol de borracha natural sob a bomba centrífuga e as travessas de madeira que está apoiada a seção de teste têm a função de reduzir à vibração e a sua propagação ao longo da estrutura.

FIGURA 24 – PROJETO DA BANCADA GERADORA DE FAC



FONTE: O autor (2019)

A construção da bancada geradora de FAC foi realizada conforme apresentado no APÊNDICE B. Contudo, foi necessário realizar algumas adaptações durante a montagem (ver FIGURA 25). Sendo, as mais significativas, um apoio na tubulação de sucção, para reduzir os esforços nas conexões devido ao peso da tubulação e do fluido; e um tirante para a sustentação do medidor de vazão, evitando que seu peso seja suportado somente pela tubulação de PVC.

Na FIGURA 25, também é possível notar as canaletas fixadas na estrutura relativas à parte da fiação de sensores e equipamentos. Do lado esquerdo acima da bomba encontra-se o painel elétrico, o qual pode ser melhor visualizado na FIGURA 26. O painel contém relés de estado sólido, inversor de frequência, fonte 24 V e um chassi *compactDAQ 9184* da *National Instruments™* (NI), com quatro *slots*. Para o ensaio foram usados três módulos, o NI-9211 para a aquisição de sinais de tensão (termopares), o NI-9203 para a aquisição de sinais de corrente (medidor de vazão e transdutor de pressão) e o NI-9472 que possui saídas digitais, possibilitando ligar/desligar as resistências e a bomba.

FIGURA 25 – CONSTRUÇÃO DA BANCADA GERADORA DE FAC



FONTE: O autor (2019)

FIGURA 26 – PAINEL ELÉTRICO



FONTE: O autor (2019)

A interface de controle do sistema gerador de FAC foi realizada através de conexão *Ethernet* da cDAQ com auxílio do software *LabVIEW*, ver a seção 4.5.2.

4.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de FAC foram realizados com velocidades diferentes de escoamento ($7,50$ a $10,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) que garantissem a não ocorrência de erosão e garantindo assim que a corrosão fosse controlada pela transferência de massa. O fluido utilizado tinha o pH neutro, pH igual a $7,0 \pm 0,5$, como verificado na pesquisa teórica (FIGURA 11) entre o pH de $6,0$ a $8,0$ a concentração de ferro permanece a mesma, não influenciando significativamente com a sua variação. A temperatura de $50,0 \pm 1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Haverá a coleta informações sobre a vazão, temperaturas do fluido e ambiente e pH. O teor de íons ferro no fluido de circulação será monitorado, pois na ausência de tratamento de água o íon ferroso (Fe^{+2}) é termodinamicamente estável, em vez de magnetita, por isto será trabalhado até 50 % de seu limite de solubilidade conforme indicado na literatura (BETOVA; BOJINOV; SAARIO, 2010). O monitoramento da FAC será realizado através de métodos de Ensaios Não Destrutivos (END), tais como exame visual (boroscópio) e ultrassom.

Conforme ensaios similares realizados e publicados, os testes de laboratório duraram de três a quatro semanas (450 a 650 horas) de acordo com a evolução da FAC na seção de teste e o nível de degradação pretendido (YONEDA et al., 2016). Para o presente trabalho foi determinado o valor de, aproximadamente, 500 horas para cada ensaio. O controle do potencial de oxidação e do oxigênio dissolvido não foram realizados durante a realização do ensaio.

Esta seção foi dividida em três partes, sendo primeiramente apresentados os equipamentos utilizados; depois o software de controle e aquisição de dados; e por último as etapas utilizadas para a realização de cada ensaio.

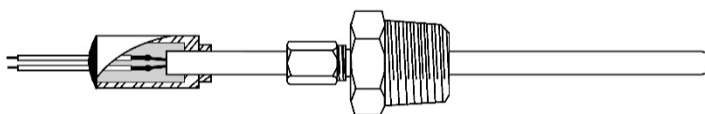
4.5.1 Instrumentos utilizados

Todos os equipamentos utilizados na aquisição de dados estão devidamente relacionados a seguir, com suas características e limitações.

4.5.1.1 Termopar

Nas medições de temperatura foram utilizados três termopares da ECIL da série MS11 (FIGURA 27), dos quais dois foram conectados aos poços termométricos do reservatório para o monitoramento da temperatura do fluido e o outro foi utilizado para a aferição da temperatura ambiente. Os termopares são do tipo T composto de dois filamentos um de cobre e outro de constantan (liga de cobre e níquel).

FIGURA 27 – TERMOPAR



FONTE: Adaptada de ECIL (2018)

Para realizar a conversão de tensão em temperatura foi utilizado o polinômio de sexto grau apresentado pela norma ASTM E230/E230M (2017). Este sensor possui a faixa de medição de 0 a 370 °C.

4.5.1.2 Medidor de Vazão

O medidor de vazão escolhido foi o modelo CTHHD 2 ½" tipo eletromagnético integral da Contech (FIGURA 28). A escolha do medidor eletromagnético se deve a presença de material particulado no fluido e ao custo, já que este é mais barato que o ultrassônico. A parte do equipamento em contato com o fluido é de aço inox com revestimento de Politetrafluoretileno (PTFE), para preservar e garantir o bom funcionamento do equipamento durante os ensaios.

FIGURA 28 – MEDIDOR DE VAZÃO



FONTE: O autor (2019)

A instalação do medidor foi realizada segundo as informações contidas no manual técnico do fabricante, Contech (2017), a posição do medidor na vertical com o fluido ascendente serve para garantir que a tubulação sempre esteja completa de fluido, o medidor deve estar após a bomba, evitando com isso o vácuo, e a uma distância mínima da mesma.

Para se realizar a medição, da vazão de um líquido, o equipamento se baseia na lei de Faraday de indução eletromagnética, necessitando com isso que o fluido tenha uma condutividade superior a $0,5 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$. E esta característica permite que alterações como temperatura, densidade, pressão, viscosidade, eletro-condutividade e a proporção de líquido-sólido no escoamento não afetem os resultados de medição. A faixa de medição do equipamento é de $5,97$ a $129,40 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. O equipamento foi calibrado pelo fabricante e o certificado do mesmo pode ser consultado no ANEXO B.

4.5.1.3 Transmissor de pressão

O medidor de pressão utilizado foi o transmissor de pressão TP ST 18 da marca TER-PRESS que opera de $0 - 4 \text{ Bar}$ (0 a 400 KPa), esta faixa foi escolhida, pois a bomba opera até 22 mca ($\sim 216 \text{ KPa}$). O transmissor possui uma saída analógica de $4 - 20 \text{ mA}$ e foi instalado na saída da bomba imediatamente antes do medidor de vazão (FIGURA 29).

FIGURA 29 – TRANSMISSOR DE PRESSÃO



FONTE: O autor (2019)

Para realizar a devida conversão de corrente para pressão foi utilizado um manômetro de teste, com divisão de $0,1 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ classe 3 da ABNT da marca SALCAS devidamente calibrado (ANEXO C), uma bomba de aferição modelo 800-D da Zurich e um notebook (ver FIGURA 30).

Com a reta de verificação devidamente adquirida foi possível realizar a conversão direta do sinal adquirido $[\text{mA}]$ para pressão $[\text{kPa}]$, por intermédio do programa de aquisição.

FIGURA 30 – TRANSMISSOR DE PRESSÃO DURANTE AFERIÇÃO



FONTE: O autor (2019)

4.5.1.4 Fotômetro

O teor de íons de ferro no fluido foi monitorado ao longo do tempo, verificando a presença de materiais gerados a partir da corrosão, incluindo o ferro particulado ou coloidal⁵, que são os principais produtos da FAC. Durante os ensaios eram retiradas amostras do fluido presente no reservatório para realizar a medição.

Este monitoramento tem a grande vantagem de constatar a ocorrência da FAC desde o início da degradação do componente. Para realizar os ensaios foi utilizado o fotômetro HI 96721 da *Hanna Instruments* (FIGURA 31).

O equipamento possui a capacidade de monitorar o teor de íons de ferro na faixa de 0,00 a 5,00 mg·L⁻¹ ⁶ da leitura e era calibrado conforme necessidade. A norma utilizada pelo equipamento, para determinar a quantidade de íons de ferro, segundo o fabricante, é uma adaptação do método USEPA 315B para águas naturais/tratadas e do método padrão 3500-Fe B para águas residuais.

⁵ Ferro coloidal é quando um ou mais componentes apresentam pelo menos uma de suas dimensões dentro do intervalo de 1 nm a 1 µm, ou seja, se refere tanto a moléculas grandes como partículas pequenas.

⁶ 1 mg·L⁻¹ é igual a 1 parte por milhão (ppm).

FIGURA 31 – FOTÔMETRO HI96721



FONTE: O autor (2019)

Antes de realizar qualquer ensaio o equipamento era calibrado. A medição era realizada em duas etapas. Primeiramente a cubeta com o fluido a ser analisado era inserido no equipamento para levar o medidor à zero, compensando, com isso, as interferências como a turbidez. A cubeta era então retirada do equipamento e adicionava-se o reagente. O reagente é composto de dois agentes, o primeiro de redução, convertendo todas as formas presentes de ferro em íons ferrosos (Fe^{2+}) ou ao estado solúvel; e o segundo um complexante (fenantrolina), que reage com o ferro ferroso para formar o complexo de cor laranja. A cubeta era tampada, inserida novamente no equipamento e esperava-se três minutos até a medição ser realizada.

Após cada medição era realizada a verificação do equipamento, para validar, ou não a medida obtida. Para isso utilizava-se duas amostras padrão uma para levar o medidor a zero e a segunda que contém $1,50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de ferro, a qual era utilizada para fazer a verificação do equipamento. A medição só era considerada válida se no final do processo de verificação a leitura pertencesse ao intervalo de 1,45 a $1,55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Se a verificação ficasse fora do intervalo previsto era necessário recalibrar o equipamento e realizar uma nova medição.

Durante os ensaios percebeu-se a necessidade de aumentar a faixa de medição do equipamento, sendo assim procedeu à diluição da amostra retirada do ensaio com água deionizada, isenta de minerais, em uma concentração de dez por cento. Aumentando com isso a faixa de leitura para 0,0 a $50,0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, mas reduzindo a precisão em uma casa decimal.

4.5.1.5 Medidor de pH/ORP/temperatura

O medidor de pH/ORP/temperatura utilizado foi o HI 991002 e um eletrodo pH/ORP/temperatura HI 1297, ambos da *Hanna Instruments* (FIGURA 32), que realizava a compensação automática do pH devido à temperatura. Durante os ensaios eram retiradas amostras do fluido presente no reservatório para realizar a medição.

FIGURA 32 – MEDIDOR DE pH/ORP/TEMPERATURA



FONTE: O autor (2019)

O medidor e o eletrodo já vieram calibrados e certificados de fábrica (ANEXO D). Mesmo assim o equipamento era calibrado ao início de cada ensaio, utilizando soluções tampão de pH 4,01 (HI 7004) e 7,01 (HI 7007) a 25,0 °C. A calibração, segundo o manual do fabricante, deve ser realizada pelo menos uma vez ao mês, para uma melhor acuracidade do equipamento.

Para realizar as medições é necessário conectar o eletrodo ao equipamento de medição primeiramente. Após isso escolhesse a função pH ou ORP, e submerge o eletrodo no fluido a ser avaliado enquanto mexe-se suavemente. Espera-se até o escrito “*Not Stable*” desaparecer (HANNA, 2012).

Procedimentos de preparação, medição, limpeza, armazenamento e manutenção periódica foram realizados conforme manual de instruções do equipamento (HANNA, 2018).

4.5.1.6 Boroscópio

A inspeção visual foi realizada, durante o ensaio, através da conexão T de 45° localizada no final da seção de teste (ver FIGURA 24). O ensaio era paralisado por um curto período de tempo para realizar a inspeção. Ao final da inspeção o boroscópio era retirado e o ensaio retornava.

Para realizar a verificação visual foi utilizado o boroscópio *MENTOR Visual IQ* da *General Electric* (GE) (FIGURA 33). Este equipamento além da análise visual, qualitativa, também realiza Medições de Fase 3D (3DPM) e medições 3D em estéreo. O equipamento já vem calibrado de fábrica (ANEXO E). Neste trabalho foi utilizado o 3DPM por ser mais preciso nas medições de profundidade, este sistema foi melhor descrito na seção 2.2.1.1. As medições foram realizadas conforme o manual do fabricante e a precisão das medições estão na casa dos centésimos de milímetros. Para realizar as medições foram utilizadas as ponteiras ópticas próprias para a o 3DPM, sendo uma com a visão frontal e outra com a visão na lateral.

FIGURA 33 – BOROSCÓPIO MENTOR VISUAL IQ DA GE



FONTE: O autor (2019)

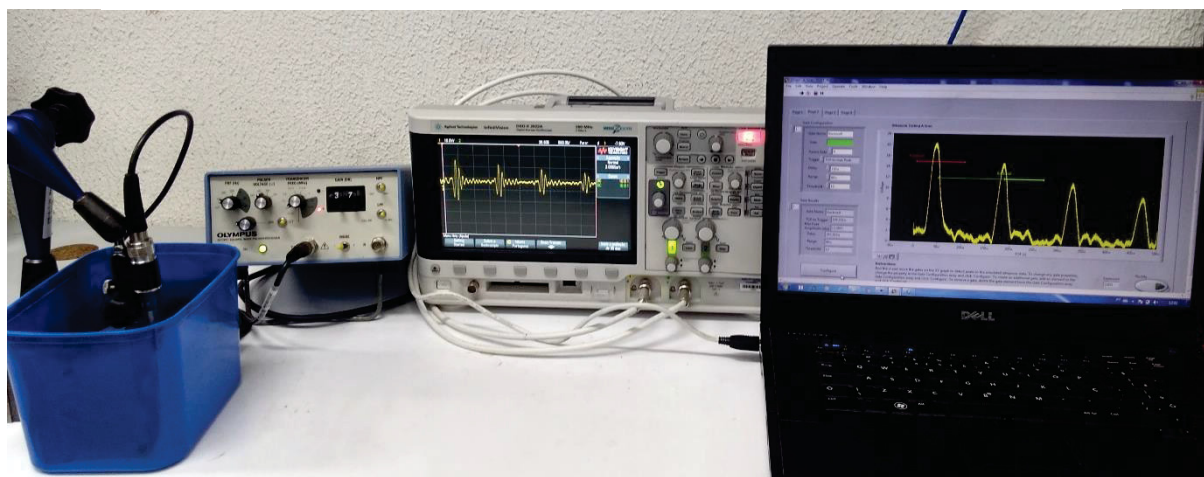
O equipamento possibilita que se faça a visualização, medição e análise um defeito e/ou região usando a mesma ponta óptica. Isso se deve ao amplo campo de visão e grande profundidade de campo, eliminando as etapas de recuar, trocar a ponteira e, em seguida, recolocar a sonda.

A medição de fase 3D realiza uma varredura 3D da superfície visualizada e pode se medir todos os aspectos das indicações superficiais. É possível visualizar e manipular a nuvem de pontos 3D para uma melhor avaliação da superfície e correção da medição (GE, 2017).

4.5.1.7 Ultrassom

O equipamento de ultrassom usado foi o gerador de sinais 5077PR da *Olympus*, que recebia o sinal da sonda de ultrassom de imersão de 10 MHz. O sinal era transmitido para o osciloscópio DSO-X 2022A da *Agilent Technologies*. Posteriormente o sinal era processado e tratado no programa do *LabVIEW* (FIGURA 34).

FIGURA 34 – SISTEMA UTILIZADO PARA ANÁLISE POR ULTRASSOM



FONTE: O autor (2019)

Na FIGURA 34, se encontram da esquerda para a direita a sonda de ultrassom, o ultrassom, o osciloscópio e o *notebook* com o programa. O programa utilizado no *LabVIEW*, foi adaptado de programas disponíveis na biblioteca online da NI, a estruturação do programa pode ser melhor visualizada no APÊNDICE C.

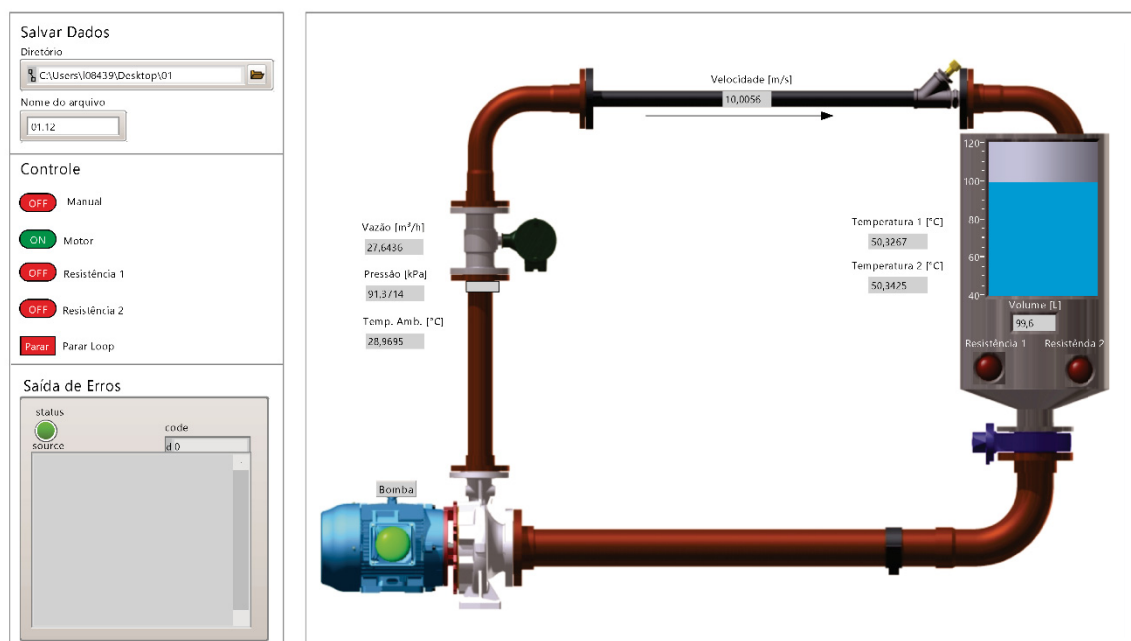
4.5.2 Aquisição de dados

A aquisição de dados foi realizada pelo software *LabVIEW*, utilizando o hardware, já citado, da NI (final da seção 4.4). Foi adquirido durante o ensaio, de forma contínua, as temperaturas do fluido e ambiente, a pressão e a vazão. O programa

também possibilitava a conferência do nível de fluido no reservatório e controle remoto da bomba e das resistências.

A FIGURA 35 mostra a interface usada para o controle do sistema e verificação dos dados, que são atualizados a cada segundo. Além dessa aba o programa criado tem outras duas abas que permitem a visualização dos dados ao longo das últimas vinte e quatro horas de ensaio. O diagrama de blocos, estrutura da informação, do *LabVIEW* se encontra no APÊNDICE D.

FIGURA 35 – INTERFACE *LABVIEW*



FONTE: O autor (2019)

O programa tinha a taxa de aquisição de 100 Hz, fazendo a média desses pontos a cada segundo. Essas médias eram utilizadas para mostrar os dados na tela e a cada minuto era realizado a média das médias e o desvio padrão das médias. E esses dados eram exportado/salvo em um arquivo texto. O programa registrava a data completa, a pressão, as temperaturas do fluido (dois termopares) e a ambiente e a vazão.

Como é possível analisar na FIGURA 35, do lado direito da imagem são mostradas as médias dos valores, e são atualizadas a cada segundo, já do lado esquerdo na parte superior estão à parte relativa ao diretório onde o arquivo é salvo; a parte de controle que possibilita deixar que o sistema operasse de forma automatizada, dentro de valores predefinidos ou de forma manual e desligar o sistema; e na parte inferior ficam registrados os possíveis erros que aconteçam durante o ensaio.

4.5.3 Etapas do ensaio

As etapas para a execução do ensaio foram separadas em três partes a primeira é a de preparação do ensaio, a segunda é durante ensaio e a terceira é o pós-ensaio.

Para realizar a preparação do ensaio foram seguidas as seguintes etapas:

- a) Calibrar os medidores de pH e teor de íons de ferro;
- b) Inspeccionar visualmente (boroscópio) e ultrassom na seção de teste;
- c) Limpar a seção de testes (desengraxe);
- d) Fixar a seção de teste na estrutura;
- e) Encher o reservatório até a marca de 100 litros, ou seja, 125 litros no sistema (reservatório mais tubulação);
- f) Ligar as resistências e motor da bomba (velocidade de 2,00 a 3,00 m·s⁻¹), para realizar o aquecimento gradativo do sistema até a temperatura de ensaio;
- g) Verificar a existência de problemas, enquanto ocorre o aquecimento.

Depois que o fluido atingia a temperatura de ensaio (50,0 °C), cerca de três horas, começava o ensaio, sendo então realizadas as seguintes etapas:

- a) Ajustar a vazão para a velocidade de ensaio pretendida;
- b) Medir a condição inicial do fluido (pH e teor de íons de ferro);
- c) Acompanhar os valores da velocidade de escoamento (vazão), pressão e temperaturas;
- d) Ajustar a vazão, pelo inversor de frequência, assim que necessário;
- e) Completar o reservatório, devido a pequenas perdas (vazamentos, evaporação do reservatório etc.), conforme necessidade;
- f) Coletar os valores de pH e teor de íons de ferro no fluido, retirando amostras do fluido no reservatório;
- g) Corrigir o valor do pH, com a adição de um redutor de alcalinidade e pH, quando o valor era elevado. Adicionava-se um mililitro do redutor no reservatório. Esperava-se uma hora, e a medida do pH era refeita. O processo era feito conforme necessidade;
- h) Inspeccionar visualmente com o boróscopio, conforme necessidade, após curta parada.

Término do ensaio após aproximadamente 500 horas de ensaio. Eram realizadas as seguintes etapas:

- a) Medir a condição final do fluido (pH e teor de íons de ferro), retirando uma amostra de fluido do reservatório;
- b) Desligar o sistema gerador de FAC;
- c) Esgotar o fluido e abertura do dreno da bomba;
- d) Limpar o reservatório e tubulação. Procedia a limpeza do reservatório, posteriormente desmontava-se a tubulação de recalque e sucção e sua limpeza era realizada e a drenagem do fluido que permanecia na bomba. Posteriormente a bancada era montada e deixava-se água recircular para retirar o resquício;
- e) Verificar os componentes do sistema gerador de FAC;
- f) Retirar a seção de testes da estrutura para se realizar as inspeções por ultrassom e visual;
- g) Analisar os dados.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e comentados os resultados obtidos durante a realização do ensaio de Corrosão Acelerada pelo Fluxo (FAC). Primeiramente são apresentadas as características gerais, e as análises levando em consideração a temperatura, as características fluido-dinâmicas e químicas. Posteriormente, são apresentados os resultados dos modelos matemáticos e dos ensaios não destrutivos. E por último são mostrados os dados dos ensaios complementares (metalografia, Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV), Espectrometria por Energia Dispersiva de raios-x (EDS) e Difração de Raios-X (DRX)) do óxido formado.

5.1 ENSAIOS REALIZADOS

Foram realizados quatro ensaios, relevantes ao tema abordado (TABELA 3). Os dados mostrados são as médias dos dados obtidos a cada minuto durante o respectivo ensaio, juntamente com a incerteza da média, com confiabilidade de 99 %, e o desvio padrão (σ). Os dados da tabela serão analisados em seções subsequentes.

TABELA 3 – ENSAIOS REALIZADOS

ENSAIOS		E00	E01 MÉDIA (σ)	E02 MÉDIA (σ)	E03 MÉDIA (σ)
Velocidade	[m·s ⁻¹]	---	9,98 ± 0,02 (0,90)	8,75 ± 0,01 (0,10)	7,54 ± 0,01 (0,05)
Pressão	[kPa]	---	83,81 ± 0,26 (10,66)	59,15 ± 0,05 (2,10)	46,50 ± 0,05 (2,04)
Temperatura do fluido	[°C]	---	50,38 ± 0,06 (2,53)	49,85 ± 0,03 (1,49)	49,99 ± 0,01 (0,28)
Temperatura ambiente	[°C]	---	18,87 ± 0,12 (4,49)	19,50 ± 0,11 (4,74)	18,72 ± 0,10 (3,88)
pH	[--]	---	7,56 ± 0,20 (0,17)	7,35 ± 0,32 (0,35)	7,24 ± 0,36 (0,30)
Tempo	[h]	---	499:10	500:00	499:49

FONTE: O autor (2019)

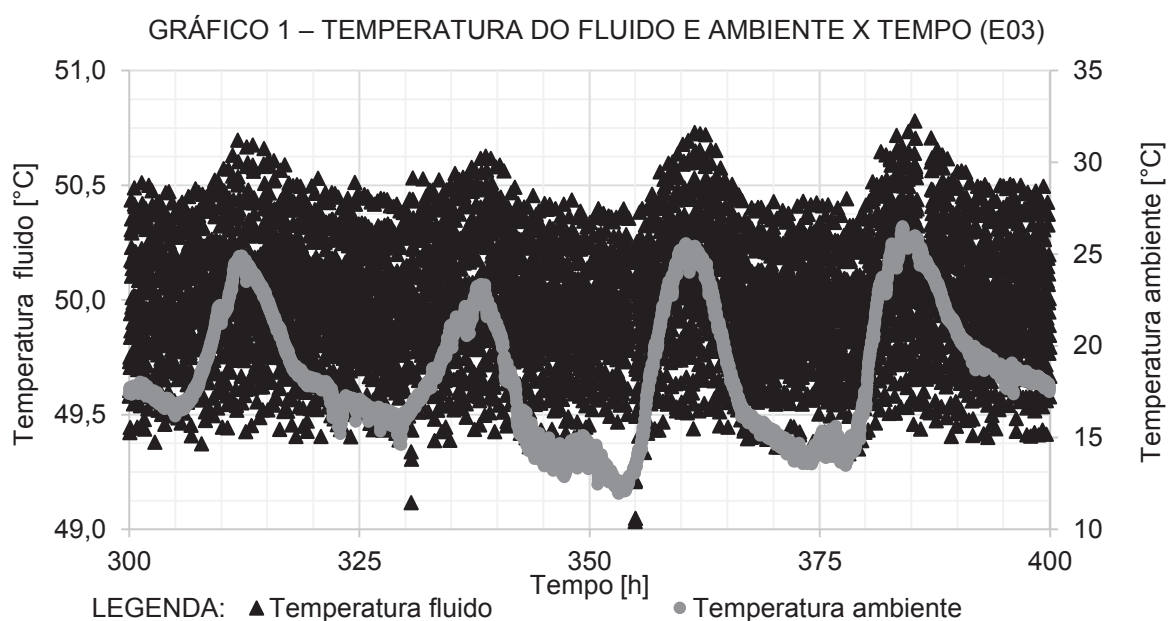
NOTA: O ensaio E00, foi utilizado para testar as limitações da bancada geradora de FAC, com velocidades diferentes e para desenvolver o procedimento experimental. Por este motivo na TABELA 3 não são apresentados valores, já que foram desenvolvidos vários ensaios de curta duração (até 50 horas).

5.2 ANÁLISE DA TEMPERATURA

Durante a realização dos ensaios verificou-se que a temperatura do fluido começa a aumentar além da temperatura prevista para o ensaio e/ou funcionamento da bancada geradora de FAC. E isso ocorria devido a duas situações distintas:

- Quando a velocidade de escoamento era maior que de $10,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Isso devido ao aumento do trabalho realizado pelas forças de atrito, sendo que parte desta era convertida em calor;
- Quando a temperatura ambiente era maior de $20,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (GRÁFICO 1). Com o aumento da temperatura ambiente a quantidade de calor perdida por convecção, das partes quentes do sistema, era reduzida e, por consequência, havia o aumento da energia interna do sistema (temperatura do fluido).

O GRÁFICO 1, mostra a variação das temperaturas de fluido e ambiente durante um intervalo do ensaio três (E03). É possível constatar que a temperatura do fluido oscila entre os valores predeterminados antes do ensaio ($49,50$ a $50,30 \text{ }^{\circ}\text{C}$). A temperatura só não permanece nesse intervalo quando o reservatório era completado de água (GRÁFICO 1, pontos 330 e 355 no eixo das abscissas) ou quando a temperatura ambiente subia. Sendo assim, faz se necessário a instalação de um trocador de calor na bancada geradora de FAC, para ter um melhor controle da temperatura durante os ensaios, em trabalhos futuros.



FONTE: O autor (2019)

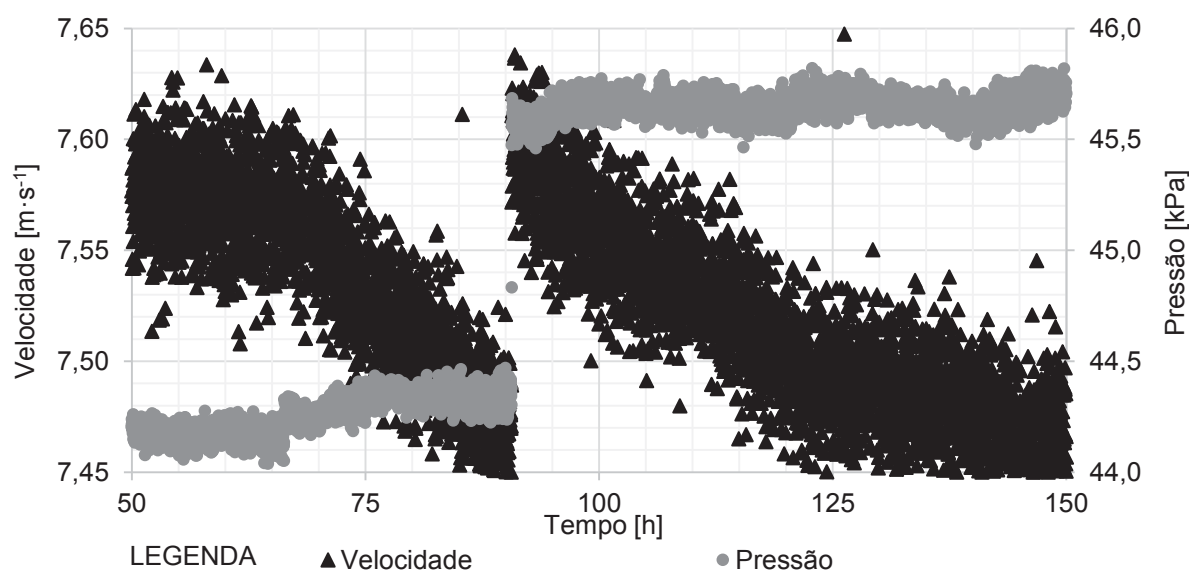
Pode-se notar na TABELA 3 que o desvio padrão (σ) da temperatura ambiente possui valores elevados (4,49, 4,74 e 3,88). Os ensaios foram realizados numa estação do ano em que a amplitude térmica é elevada, as amplitudes registradas nos ensaios foram 19,9 °C, 26,0 °C e 19,7 °C, respectivamente.

Por estes motivos alguns dos desvios padrões da temperatura do fluido ficaram com valores um pouco elevado, principalmente o primeiro (2,53) e o segundo ensaio (1,49).

5.3 ANÁLISE HIDRODINÂMICA

No decorrer dos ensaios foi possível notar que a pressão na saída da bomba, na média, subia e a velocidade do escoamento na seção de testes reduzia (GRÁFICO 2). Por esse motivo a rotação da bomba era alterada, durante o ensaio, através do inversor de frequência, para ajustar\manter a velocidade de ensaio próxima da desejada (GRÁFICO 2, perto do ponto 91 no eixo das abcissas).

GRÁFICO 2 – VELOCIDADE E PRESSÃO X TEMPO (E03)



FONTE: O autor (2019)

A perda de pressão pode ser explicada pelo aumento da rugosidade superficial interna da seção de teste. Para este ensaio o aumento da rugosidade pode ser associado a dois mecanismos:

- a) A corrosão, segundo Toloei, Stoilov e Northwood (2013), tem uma correlação com a rugosidade superficial. Conforme a rugosidade superficial pode-se disponibilizar uma área menor ou maior para estar em contato com o eletrólito, impactando diretamente na taxa de corrosão;

- b) A formação de depósito, de íons de ferro, na superfície. Este problema, segundo Vepsalainen (2010a), é um problema significativo que causa a corrosão de materiais, restrições no escoamento e redução na transferência de calor.

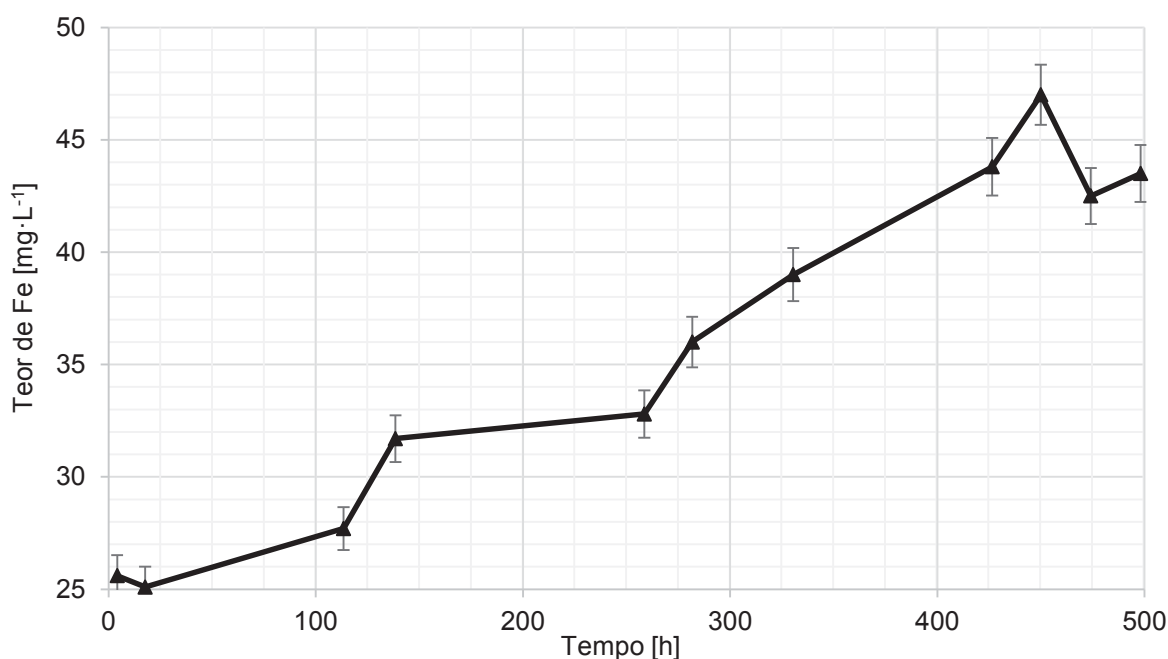
Por estes motivos percebe-se (TABELA 3) o elevado desvio padrão (σ) na pressão de saída da bomba (10,66, 2,10 e 2,04). A pressão foi utilizada apenas para o acompanhamento do ensaio, pois para o controle utilizou-se a vazão/velocidade de escoamento na seção de testes. Entretanto é possível, em estudos futuros, fazer a correlação da perda de vazão com a degradação da seção de teste.

5.4 TEOR DE ÍONS DE FERRO NA ÁGUA

Durante a realização dos ensaios verificou-se que o teor de íons de ferro no escoamento aumentou no início dos ensaios e a partir de certo período esse valor diminuiu (GRÁFICO 3, GRÁFICO 4 e GRÁFICO 5), isso fica mais evidente nos ensaios E02 e E03.

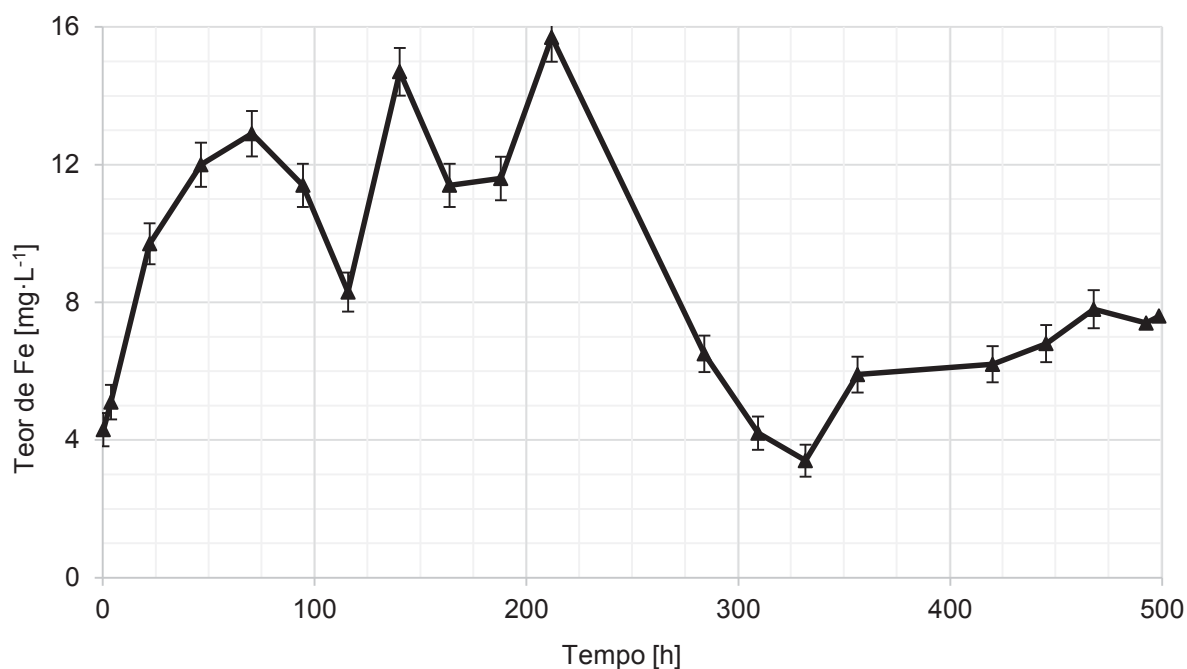
Essa alteração de comportamento se deve pelo fato que os íons de ferro produzidos pela corrosão podem dissolver-se na água e/ou depositar-se na superfície corroída do metal (SARIN et al., 2004).

GRÁFICO 3 – TEOR DE ÍONS DE FERRO (E01)



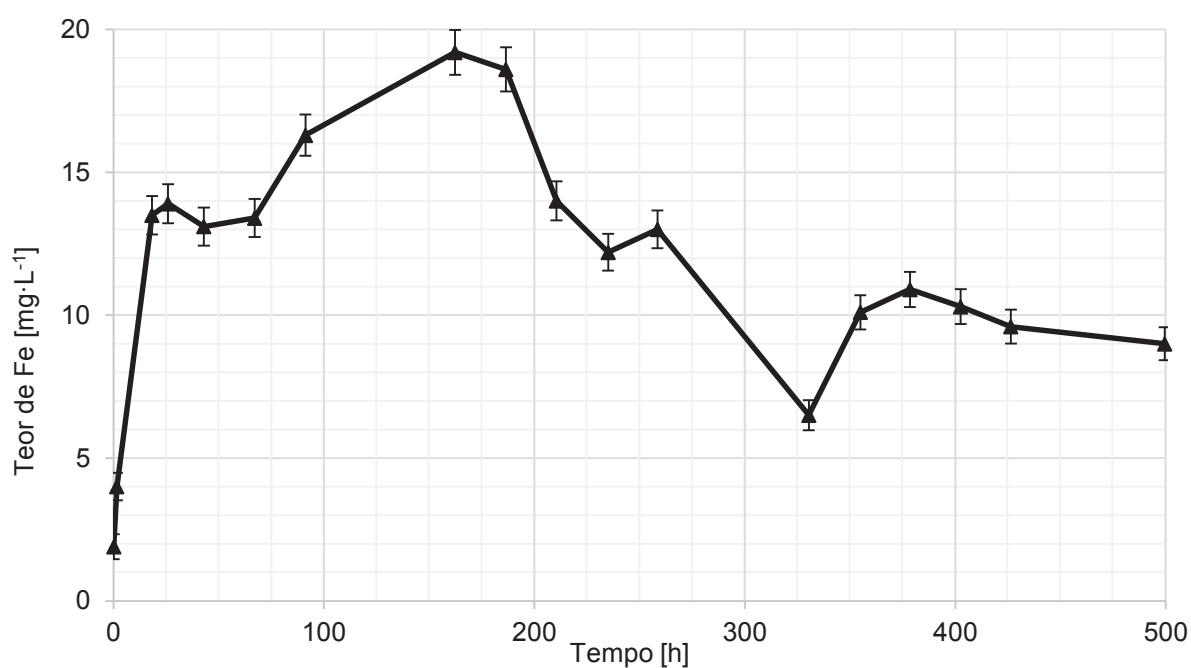
FONTE: O autor (2019)

GRÁFICO 4 – TEOR DE ÍONS DE FERRO (E02)



FONTE: O autor (2019)

GRÁFICO 5 – TEOR DE ÍONS DE FERRO (E03)



FONTE: O autor (2019)

A solubilidade se refere a quantidade que uma substância pode ser dissolvida na água e quanto menor o pH mais solúvel o ferro será (METZGER, 2005), Segundo Yoneda et al. (2016) para a temperatura de 50,0 °C e pH 7 a solubilidade total de íons de ferro é por volta de 130 ppm. Quando uma substância excede o seu limite de solu-

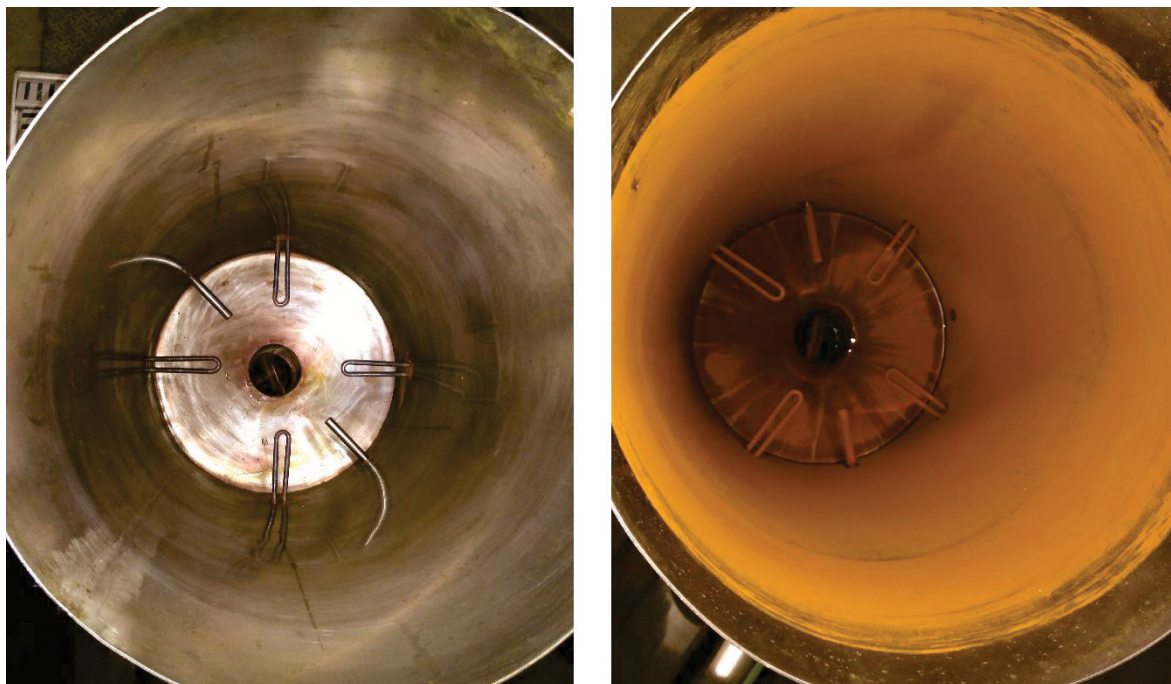
bilidade ela se deposita na superfície (KAISHA, 1999). A concentração de íons ferrosos no escoamento é muita baixa em comparação com a concentração na interface óxido\água (VEPSALAINEN, 2010b).

Segundo Jevec et al. (2003)⁷, conforme descrito por Vepsalainen (2010b), os processos de deposição são complexos e ocorrem em função do fluxo de calor, concentração de espécies, tempo, temperatura, velocidade do fluido, química e morfologia da superfície e pressão.

A deposição dos íons de ferro ocorreu em grande parte da tubulação de PVC e principalmente no reservatório (FIGURA 36). Por este motivo sempre que o ensaio era finalizado procedia a limpeza do reservatório e tubulação, logo após a drenagem do fluido.

A velocidade de escoamento tem grande influência sobre a deposição. Em baixas velocidades (ver GRÁFICO 5), a deposição pode ser alta como resultado da força gravitacional. Em velocidades intermediárias (ver GRÁFICO 4), cargas estáticas elevadas entre os particulados e a superfície podem aumentar a deposição. Em velocidades mais elevadas (ver GRÁFICO 3), a deposição pode ser reduzida pela força de cisalhamento do fluido (VEPSALAINEN, 2010b). Isso explica o decréscimo do teor de ferro durante os ensaios e o porquê de ocorrerem de formas distintas. Pois o ensaio

FIGURA 36 – RESERVATÓRIO ANTES E APÓS O ENSAIO



FONTE: O autor (2019)

⁷ JEVEC, J.M., KLIMAS, S.J., KING, P., FRUZZETTI, K., *Multivariable Assessment of Flow Accelerated Corrosion and Steam Generator Fouling: Literature Review*, EPRI, Palo Alto, CA: 2003. 1003619.

de velocidade intermediária (E02) apresentou uma taxa de deposição maior em relação ao ensaio de menor velocidade (E03) e ao ensaio de maior velocidade (E01) em que a deposição foi bem reduzida.

Faz-se necessário explicar também que o ensaio E01, foi o segundo ensaio realizado e a limpeza da tubulação não havia sido feita, pelo desconhecimento dessa necessidade, por esse motivo pôde-se verificar que o GRÁFICO 3 já se inicia com um valor elevado de íons de ferro. Mesmo assim é possível constatar, através dos teores de íons de ferro o início da deteriorização da seção de testes já nas primeiras 24 horas de ensaio, com um aumento significativo. Nos ensaios E02 e E03, pode-se perceber que mesmo com a limpeza ainda permaneceu no circuito uma quantidade de íons de ferro do ensaio anterior, já que a água utilizada tem no máximo 0,03 ppm de ferro.

5.5 CÁLCULOS TEÓRICOS

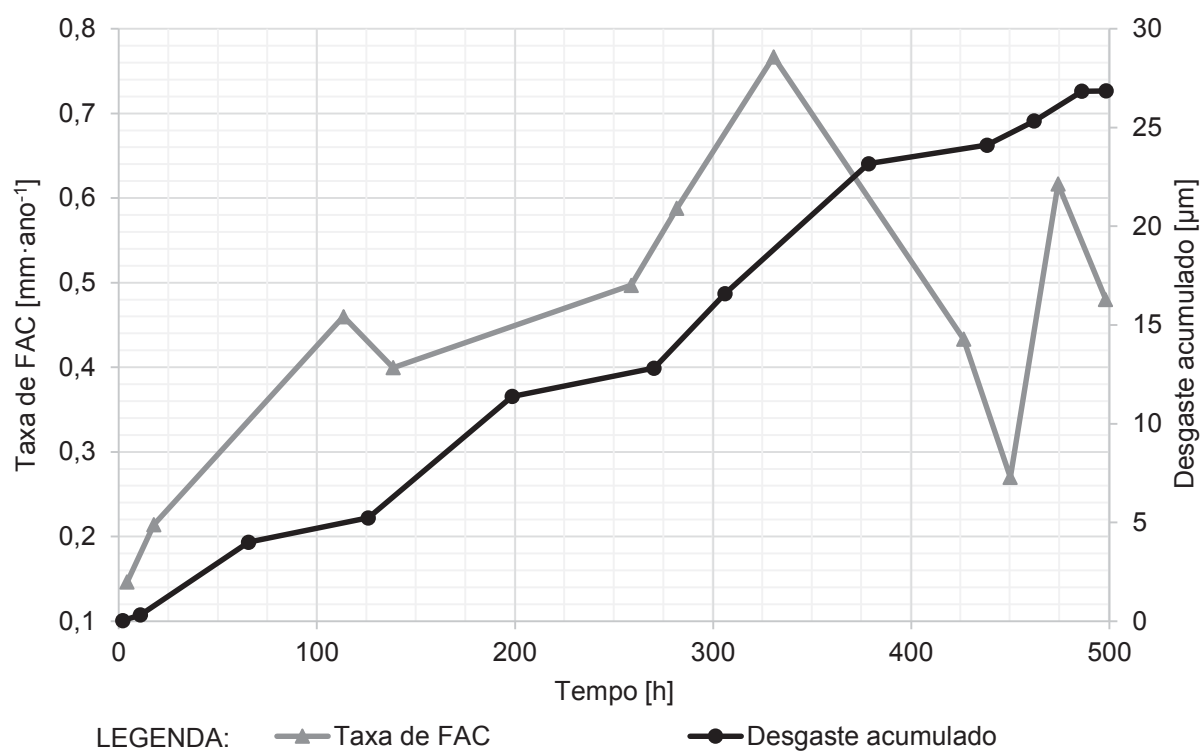
A seguir serão apresentados os resultados obtidos para os modelos de FAC, descritos na seção 3. Foram calculadas as taxas de FAC, no momento em que se verificavam as propriedades do fluido que circulava na tubulação (pH e teor de íons de ferro). Os dados são apresentados de acordo com o modelo numérico.

5.5.1 Modelo teórico de Sanchez-Caldera

Os resultados obtidos segundo a tese de Sanchez-Caldera (1984) (seção 3.1) foram agrupados nos respectivos gráficos de cada ensaio (GRÁFICO 6, GRÁFICO 7 e GRÁFICO 8). Onde foram plotadas duas curvas, uma relativa à taxa de FAC do modelo e outra do desgaste acumulado, que é somatório dos desgastes de cada período (intervalo entre as medições) calculado através da taxa de FAC média do período.

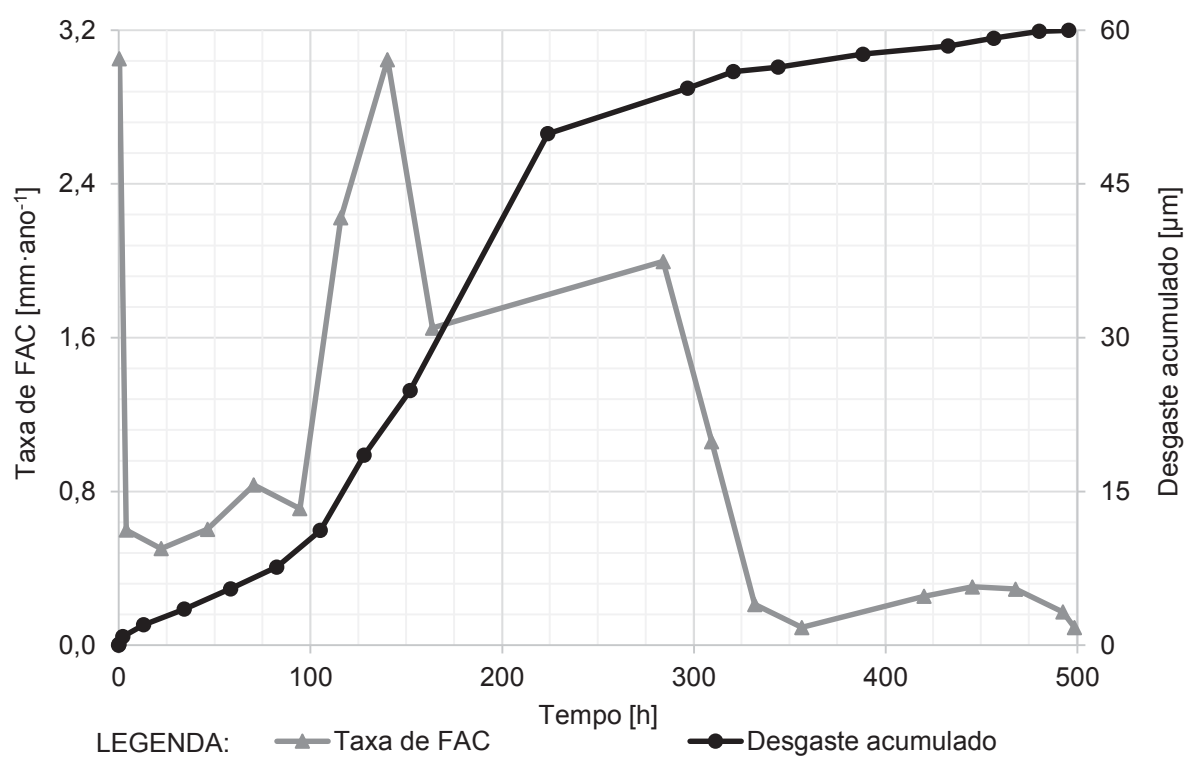
Esperava-se, segundo a literatura consultada, que os desgastes acumulados calculados nos ensaios fossem cada vez menores com a redução da velocidade de escoamento, ou seja, em ordem decrescente E01 ($10,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) > E02 ($8,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) > E03 ($7,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Isso devido aos valores do coeficiente de transferência de massa. Entretanto, como pode ser observado nos gráficos mostrados a seguir, o desgaste acumulado calculado ficou na ordem inversa a esperada E03 ($91,33 \text{ }\mu\text{m}$) > E02 ($59,67 \text{ }\mu\text{m}$) > E01 ($26,87 \text{ }\mu\text{m}$).

GRÁFICO 6 – DESGASTE TEÓRICO MODELO SANCHEZ-CALDERA (E01)



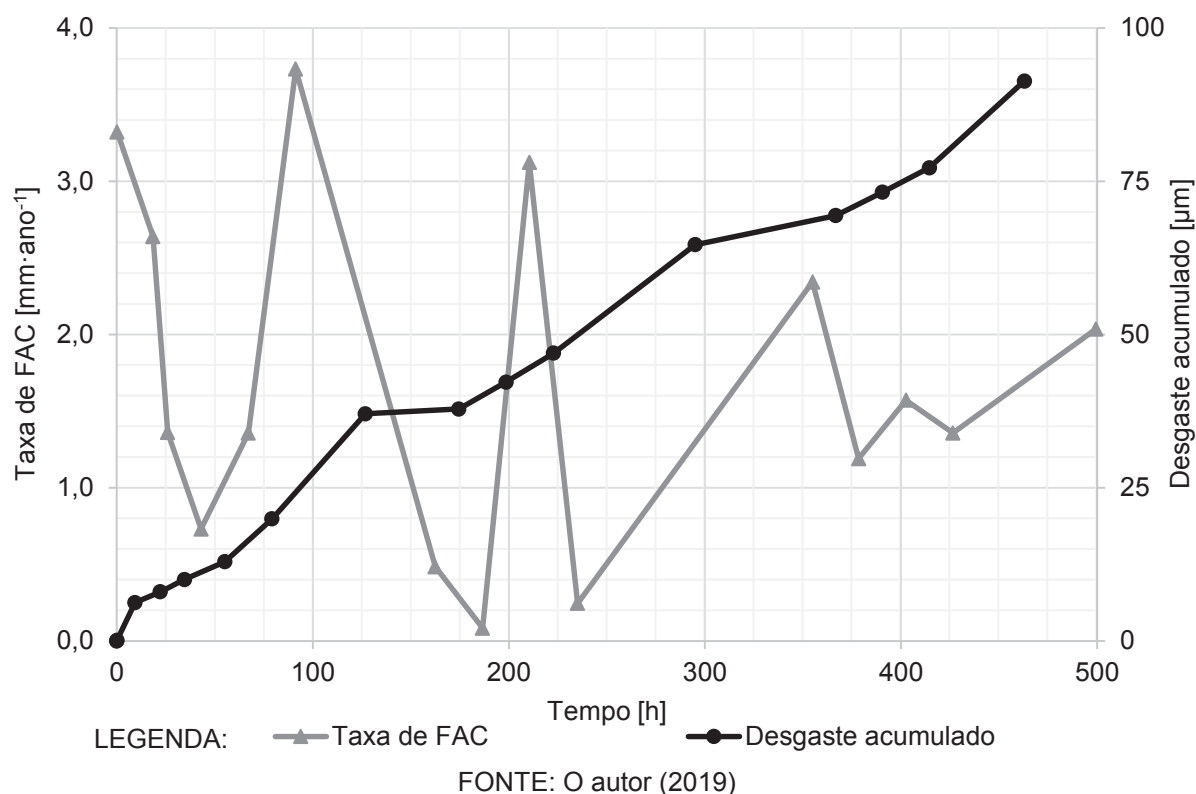
FONTE: O autor (2019)

GRÁFICO 7 – DESGASTE TEÓRICO MODELO SANCHEZ-CALDERA (E02)



FONTE: O autor (2019)

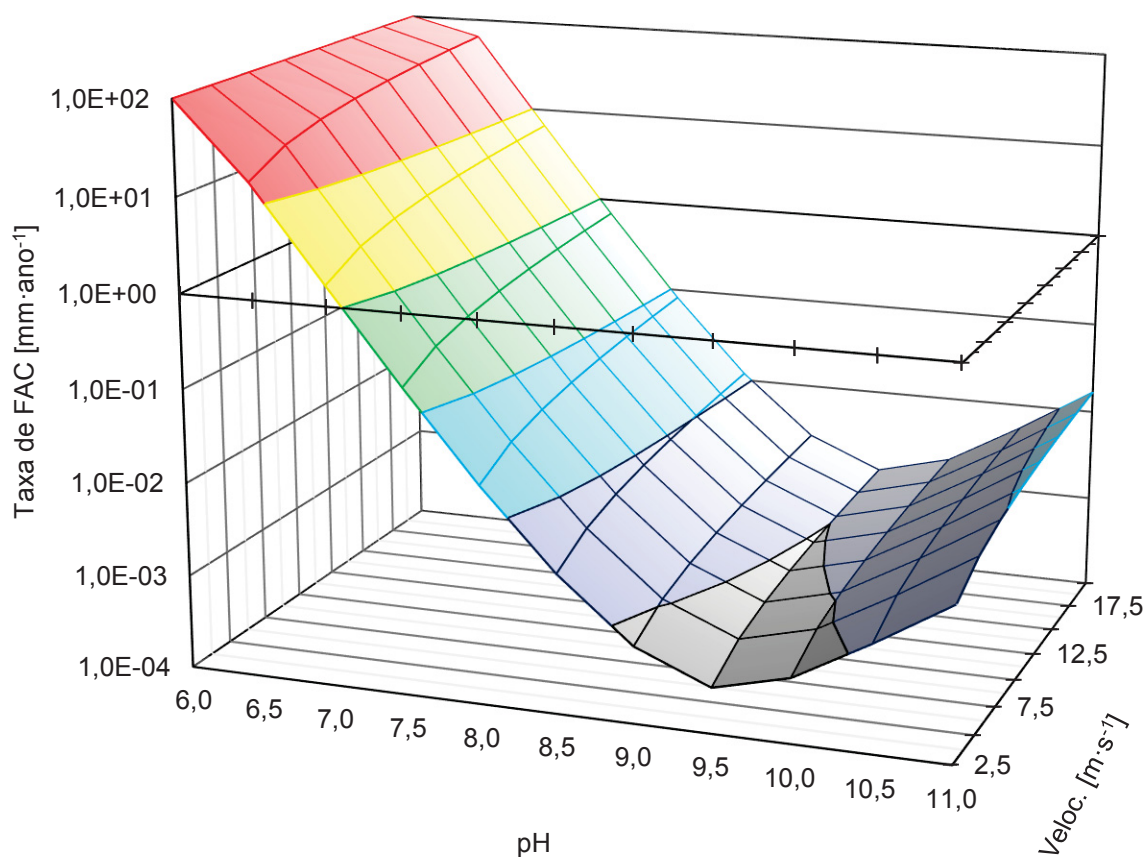
GRÁFICO 8 – DESGASTE TEÓRICO MODELO SANCHEZ-CALDERA (E03)



Para entender melhor o porquê dessa inversão de resultados foi construído o GRÁFICO 9, no qual se manteve a temperatura em 50,0 °C e foram alterados os valores de pH e velocidade em função da taxa de FAC. Assim pode-se verificar que o modelo possui uma grande sensibilidade ao valor de pH. Para verificar somente a região de interesse em que os ensaios foram realizados foi construída o GRÁFICO 10.

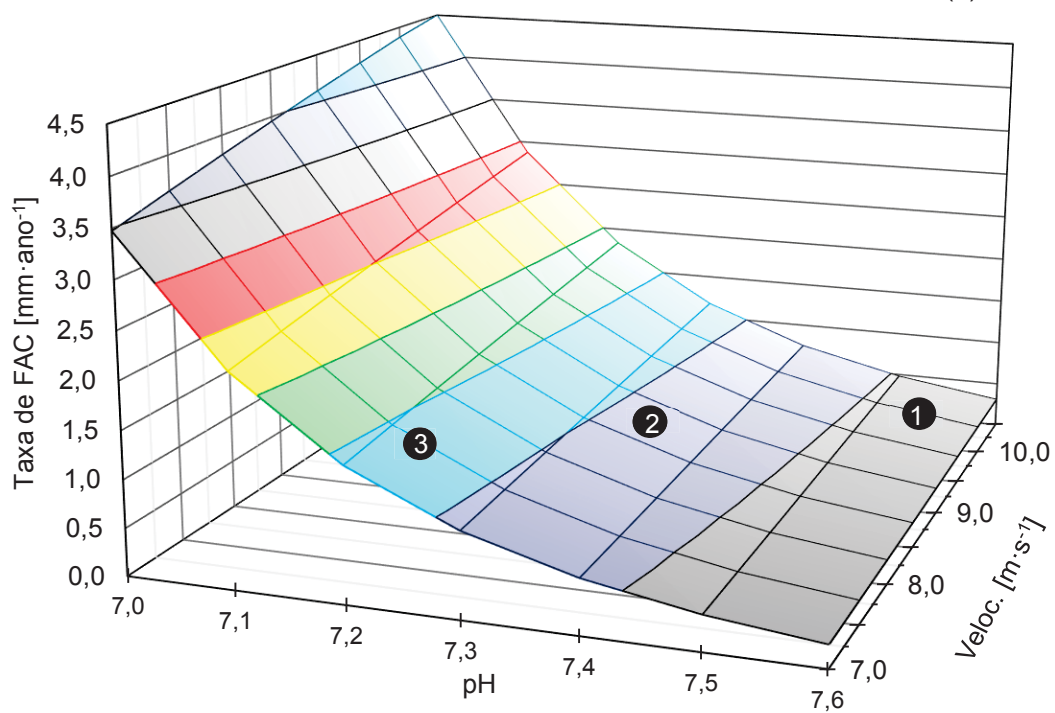
O GRÁFICO 10, além de mostrar a região de interesse, região trabalhada durante os ensaios, também contém os pontos relativo às médias registradas em cada ensaio (círculo preto com o número do ensaio). Pode-se perceber que para o modelo a variação de pH, mesmo sendo pequena tem um peso maior na taxa de FAC do que a velocidade de escoamento, por este motivo notou-se a inversão do resultado previsto. E isso se deve ao fato do modelo, apesar de ser aplicável a essa faixa de valores, foi desenvolvido para a FAC que ocorre em temperaturas e pH mais elevados, no qual o pH é mais significativo perante ao coeficiente de transferência de massa. O que não deveria acontecer, já que em baixa temperatura o coeficiente de transferência é mais significativo, ver seção 2.1.3.2.

GRÁFICO 9 – ANÁLISE MODELO SANCHEZ-CALDERA (1)



FONTE: O autor (2019)

GRÁFICO 10 – ANÁLISE MODELO SANCHEZ-CALDERA (2)



FONTE: O autor (2019)

NOTA: Os números 1, 2 e 3 representam as médias de velocidade e pH obtidas nos ensaios.

5.5.2 Modelo empírico de Kastner

Os resultados obtidos segundo a predição de FAC proposta por Kastner (seção 3.2) foram agrupados nos respectivos gráficos de cada ensaio (GRÁFICO 11, GRÁFICO 12 e GRÁFICO 13). Assim como para o modelo Sanchez-Caldera foram plotadas duas curvas, uma relativa à taxa de FAC do modelo e outra do desgaste acumulado, que é somatório dos desgastes de cada período (intervalo entre as medições) calculado através da taxa de FAC média do período.

Esperava-se, segundo a literatura consultada, que os desgastes acumulados calculados nos ensaios, assim como citado para o modelo de Sanchez-Caldera, fossem cada vez menores com a redução da velocidade de escoamento, ou seja, em ordem decrescente E01 ($10,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) > E02 ($8,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) > E03 ($7,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Entretanto, como pode ser observado nos gráficos mostrados anteriormente, o desgaste acumulado calculado ficou em uma ordem diferente da esperada E03 ($10,07 \mu\text{m}$) > E01 ($9,86 \mu\text{m}$) > E02 ($9,66 \mu\text{m}$).

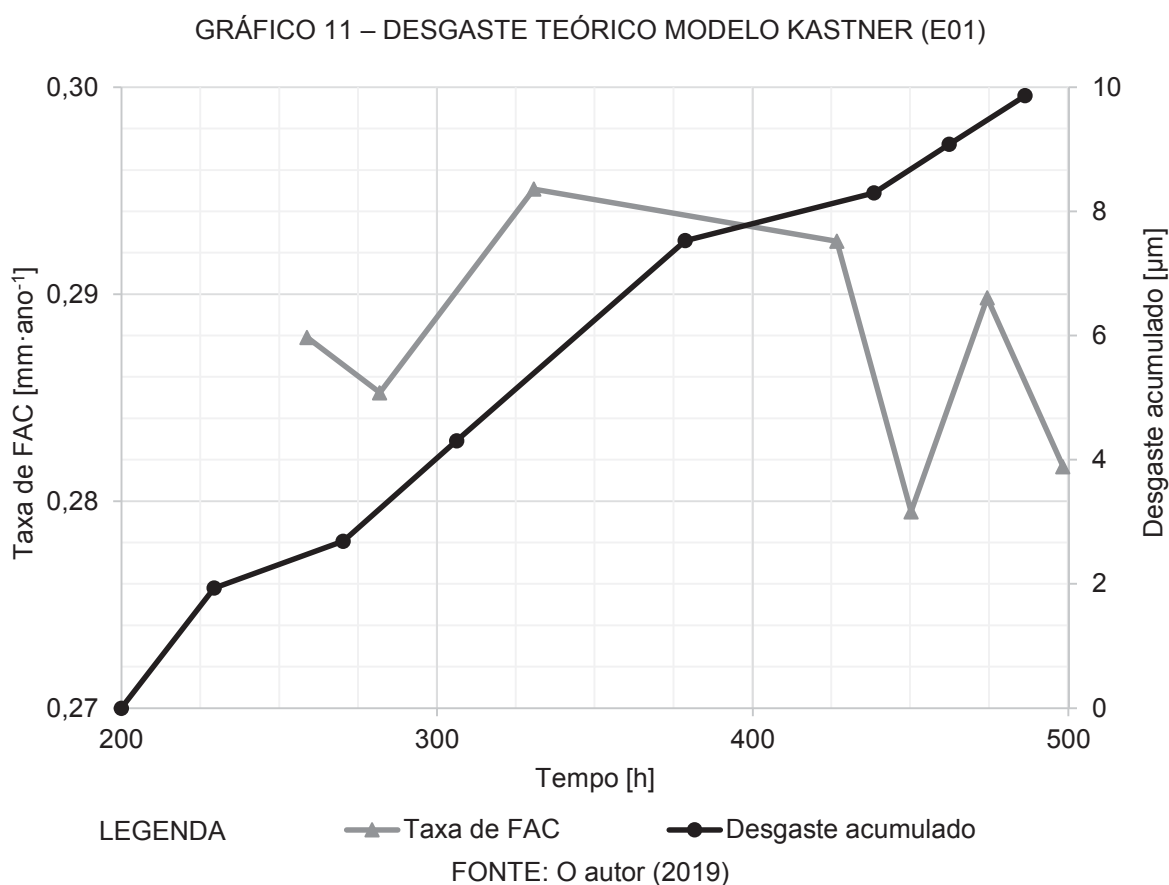


GRÁFICO 12 – DESGASTE TEÓRICO MODELO KASTNER (E02)

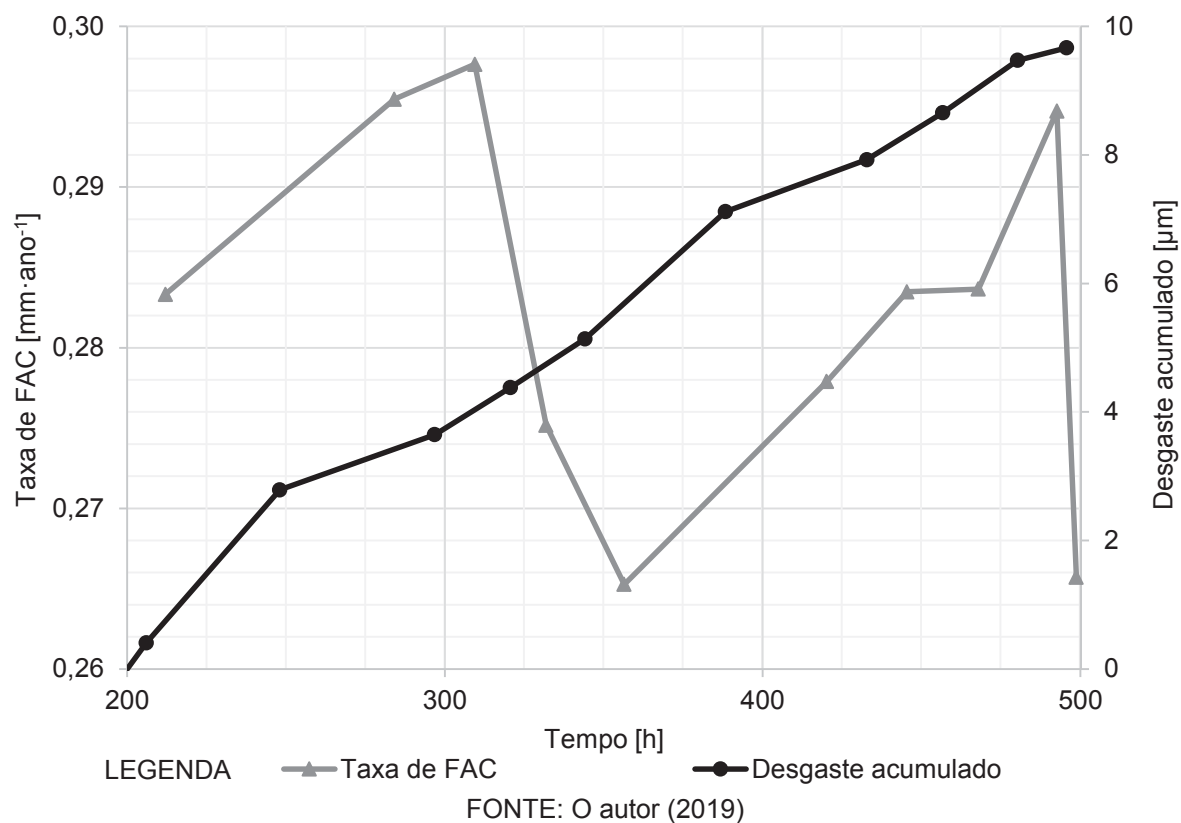
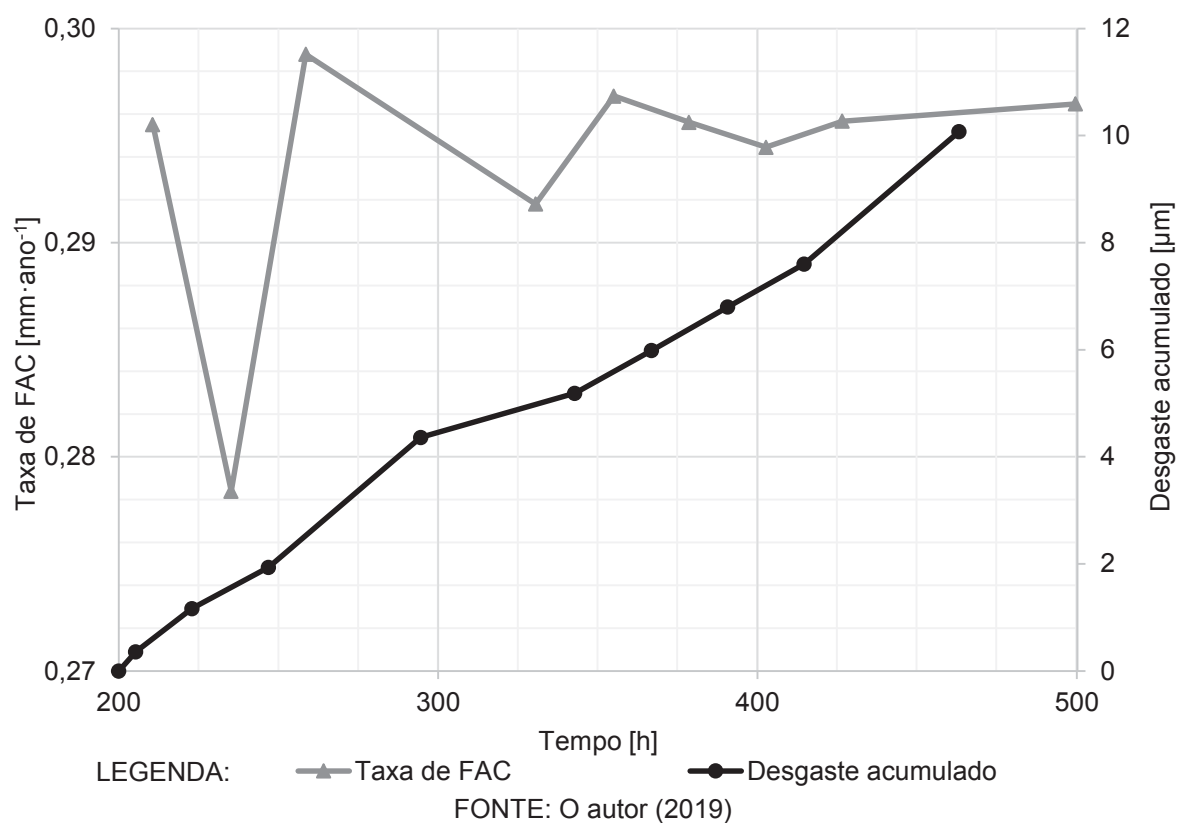
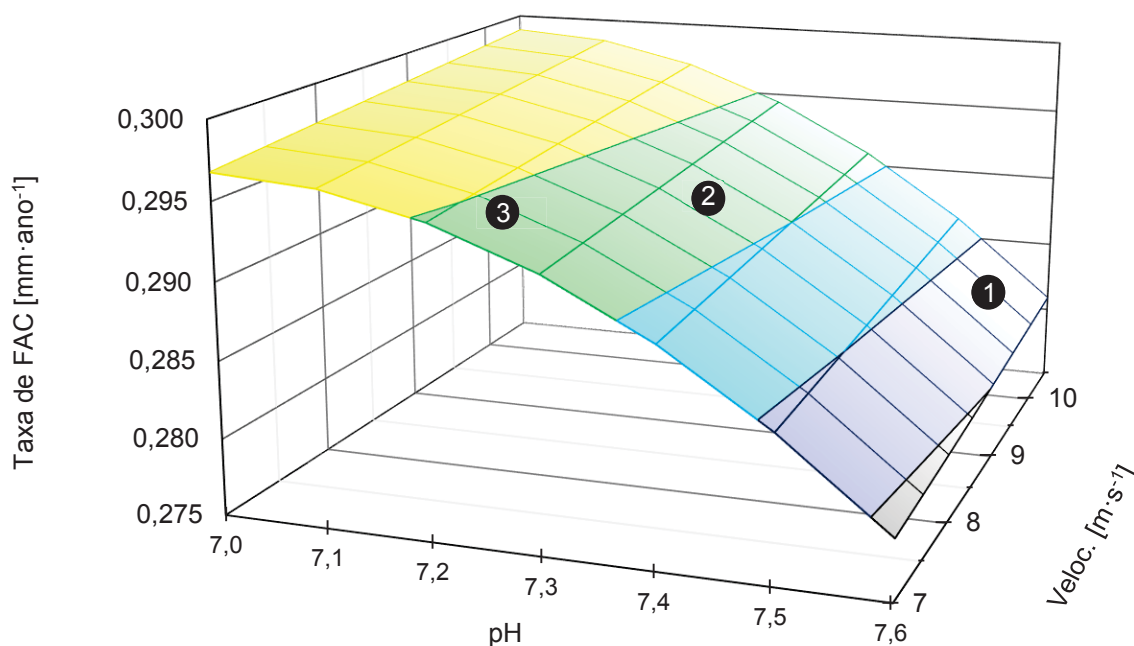


GRÁFICO 13 – DESGASTE TEÓRICO MODELO KASTNER (E03)



Para entender melhor o porquê dessa inversão de resultados foi construído o GRÁFICO 14 no qual foram fixados os valores da temperatura em 50,0 °C e tempo em 500 horas, sendo variados os valores de pH e velocidade, em função da taxa de FAC, para a região de interesse, contendo os pontos relativos às médias registradas em cada ensaio (círculo preto com o número do ensaio).

GRÁFICO 14 – ANÁLISE MODELO KASTNER



FONTE: O autor (2019)

NOTA: Os números 1, 2 e 3 representam as médias de velocidade e pH obtidas nos ensaios.

Pode-se perceber que para o modelo a variação de pH é mais significativa que a velocidade de escoamento para a taxa de FAC, por este motivo notou-se a inversão do resultado previsto, parecido com o obtido no GRÁFICO 10 do modelo Sanchez-Caldera.

Entretanto diferente do modelo Sanchez-Caldera a ordem do desgaste acumulado foi diferente, isso se deve ao fato das médias usadas no gráfico serem de todo o ensaio e no modelo de Kastner são considerados os valores a partir de duzentas horas de ensaio. Isso ocorre devido à análise de perda de massa por corrosão na qual se utiliza cupons de massa, onde se percebe um ganho de massa inicial e só após 200 horas a taxa de perda de massa se torna linear (SANCHEZ-CALDERA, 1984).

Realizando uma segunda análise, fixando o valor de temperatura em 50,0 °C e velocidade em 10,00 m·s⁻¹ e variando dessa vez o pH e o tempo, em função da taxa de FAC. Pôde-se notar que há uma incompatibilidade do modelo com a realidade, pois

com o passar do tempo para um mesmo valor de pH a taxa de FAC diminui até, aproximadamente, 13 anos de uso e depois começa a aumentar. Espera-se ainda um desgaste maior ao longo tempo devido ao aumento da área superficial (rugosidade) em contato com o fluido.

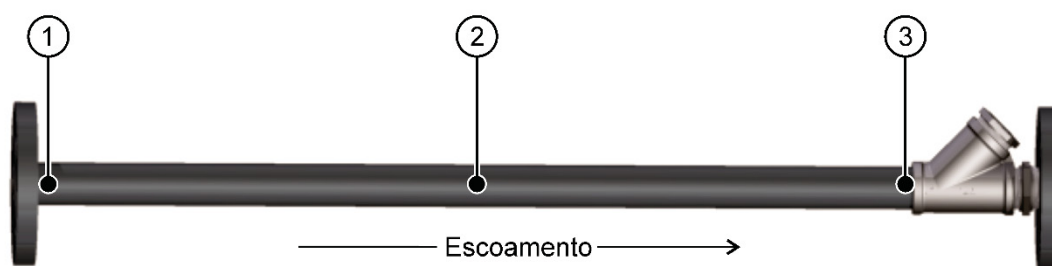
5.6 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Como mencionado anteriormente para realizar a monitoração da FAC, foram utilizados dois métodos de ensaios não destrutivos, o exame visual com Medição de Fase 3D (3DPM) e o ultrassom. Os resultados obtidos pelas técnicas são descritos a seguir.

5.6.1 Medidor de Fase 3D (3DPM)

Para a análise serão utilizadas as imagens/medições 3DPM adquiridas, com o boroscópio MENTOR Visual iQ da *General Electric*, antes e depois dos ensaios. Para cada ensaio foi realizada a análise em três áreas da seção de teste. As áreas foram distribuídas ao longo da seção de testes, sendo uma no início (1), um no meio (2) e uma no final (3) (FIGURA 37).

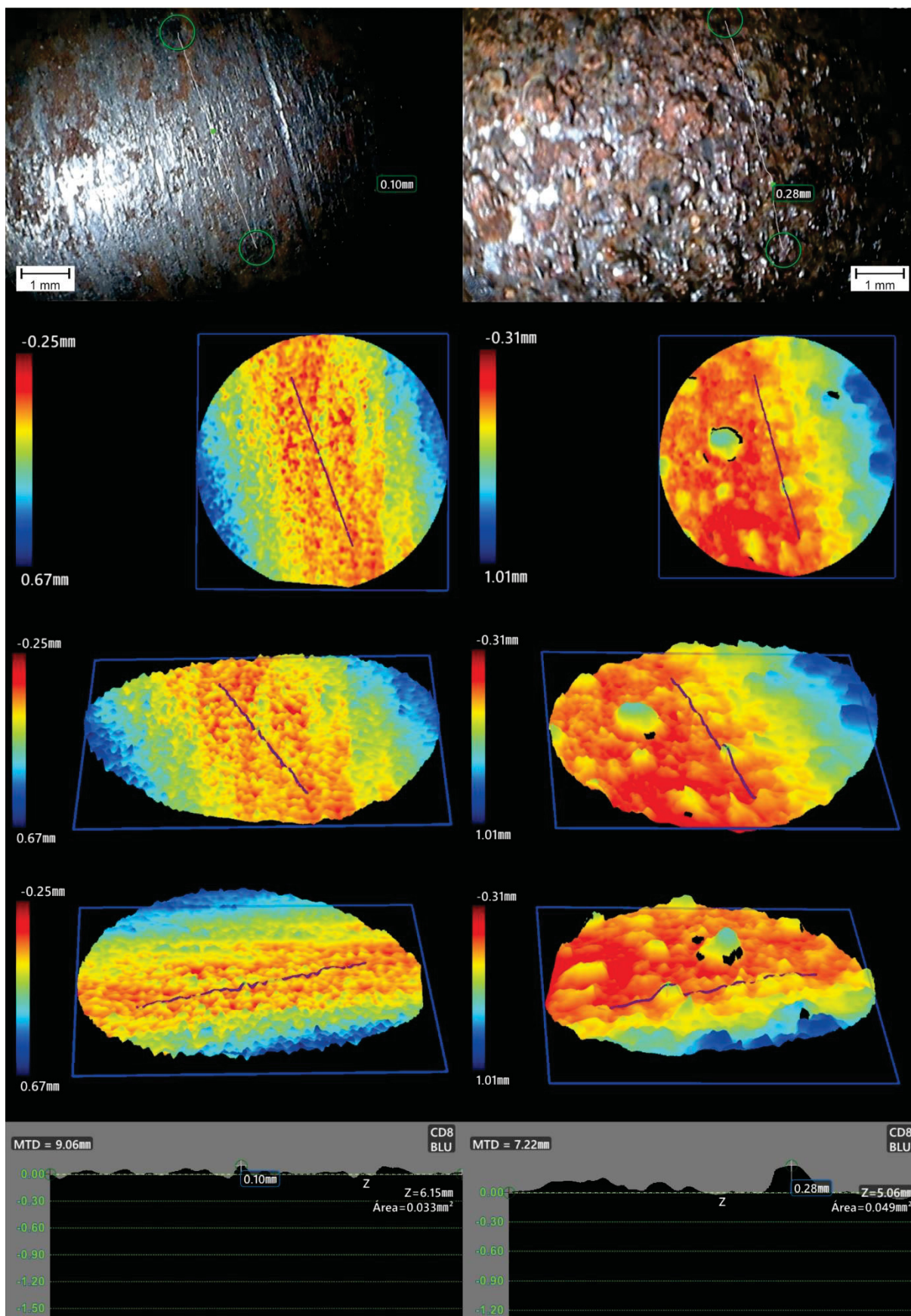
FIGURA 37 – ÁREAS DA SEÇÃO DE TESTE ANALISADA



FONTE: O autor (2019)

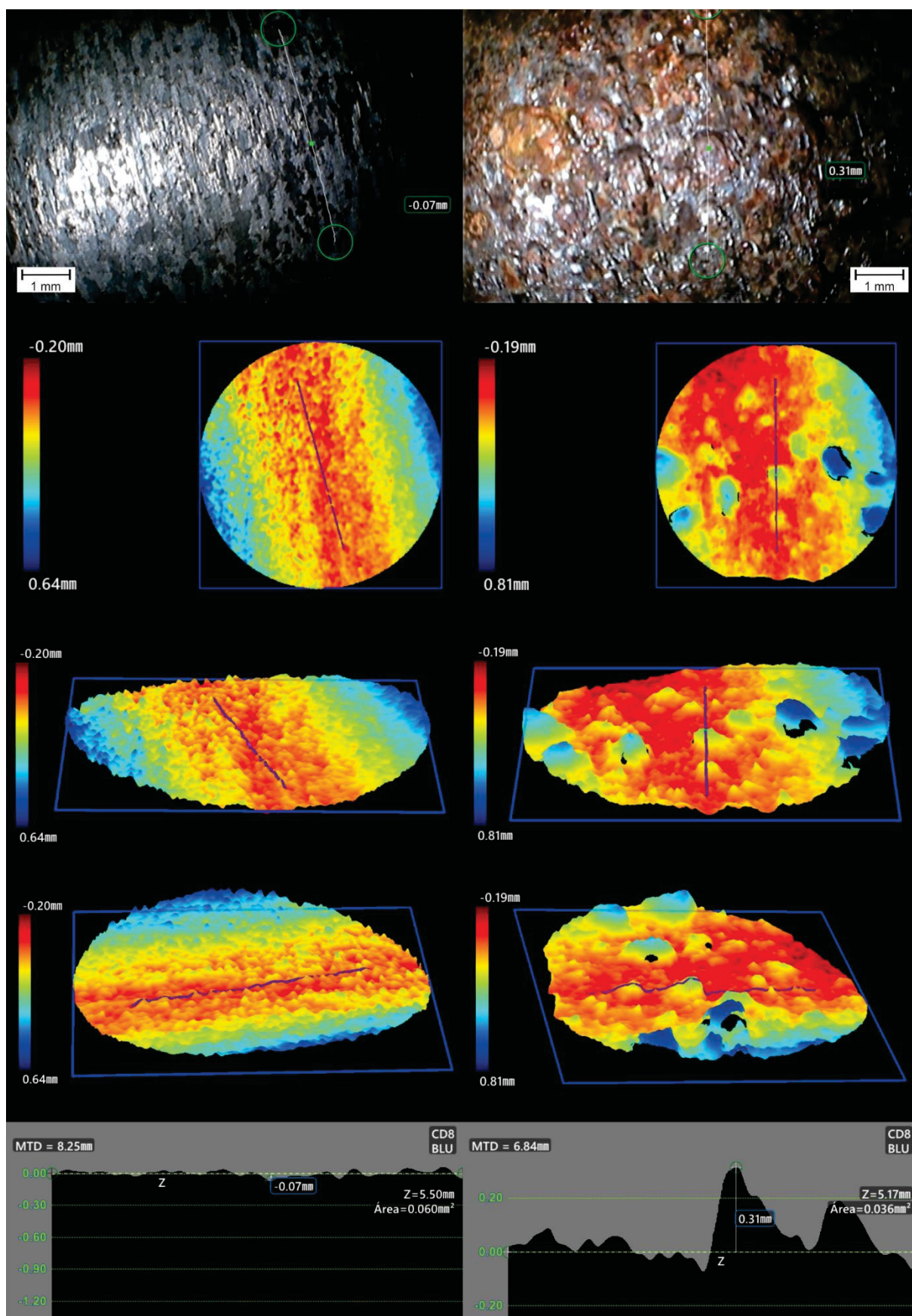
A seguir são apresentadas as figuras referentes à análise mencionada anteriormente (FIGURA 38 a FIGURA 46). As mesmas são divididas em duas colunas, sendo as imagens do lado esquerdo a inspeção antes o ensaio e as do lado direito após o ensaio. As figuras são compostas por cinco linhas de imagens, sendo que: a primeira é a imagem da superfície interna do tubo; a segunda até a quarta são imagens 3D da superfície analisada, com a vista superior e duas vistas em perspectivas, uma da frontal e outra da lateral; e a quinta é o perfil de profundidade.

FIGURA 38 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E01.1)



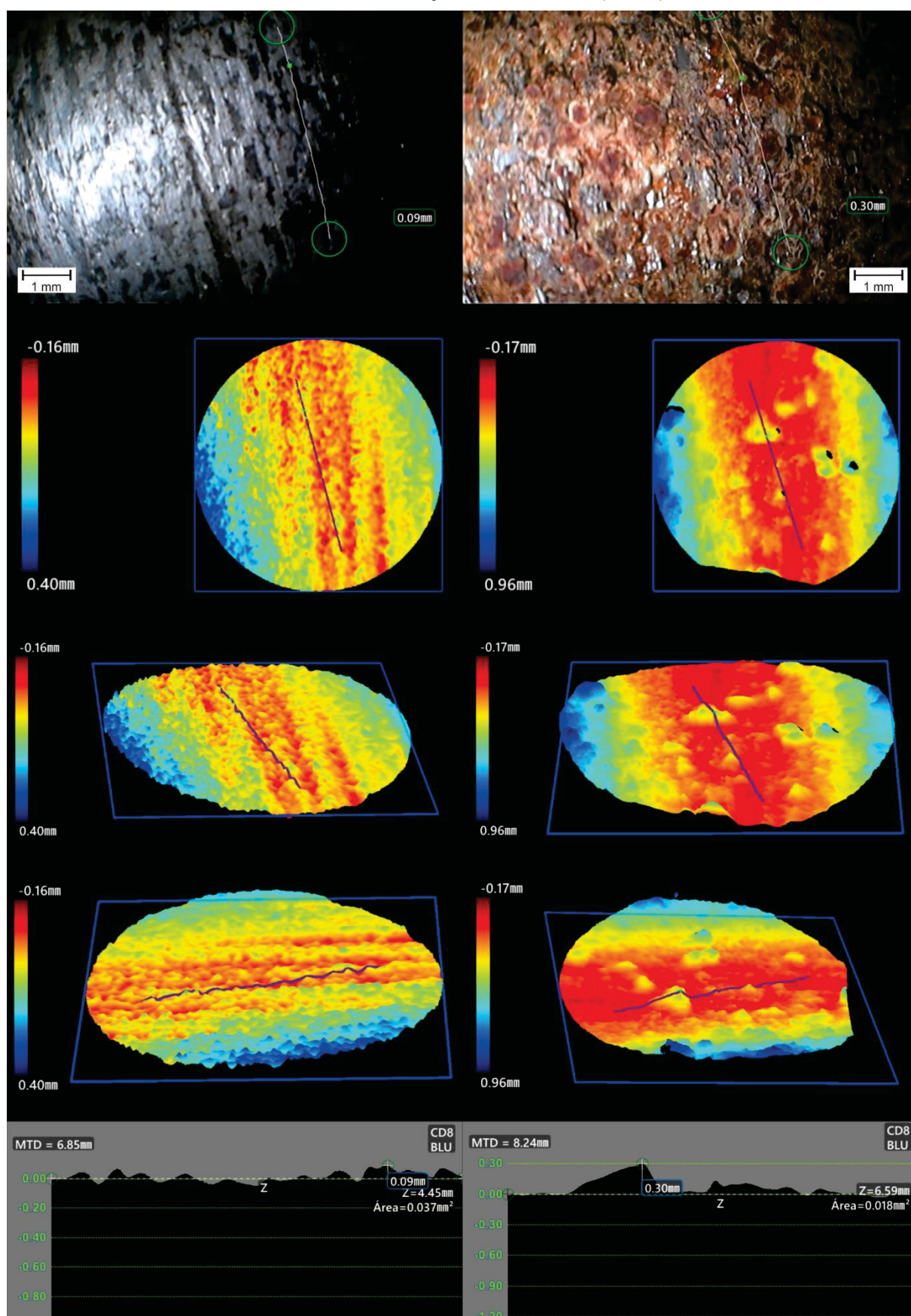
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 39 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E01.2)



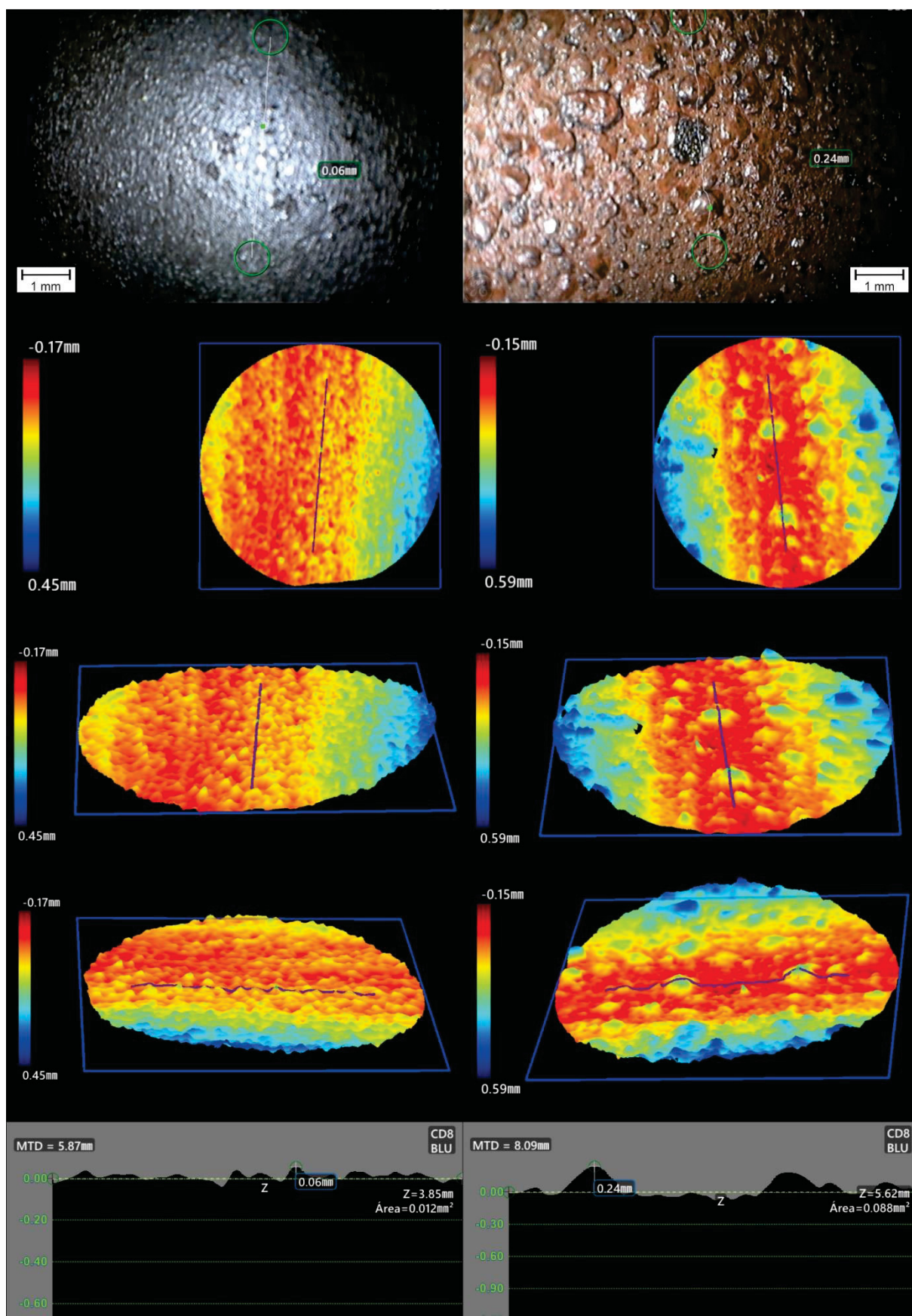
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 40 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E01.3)



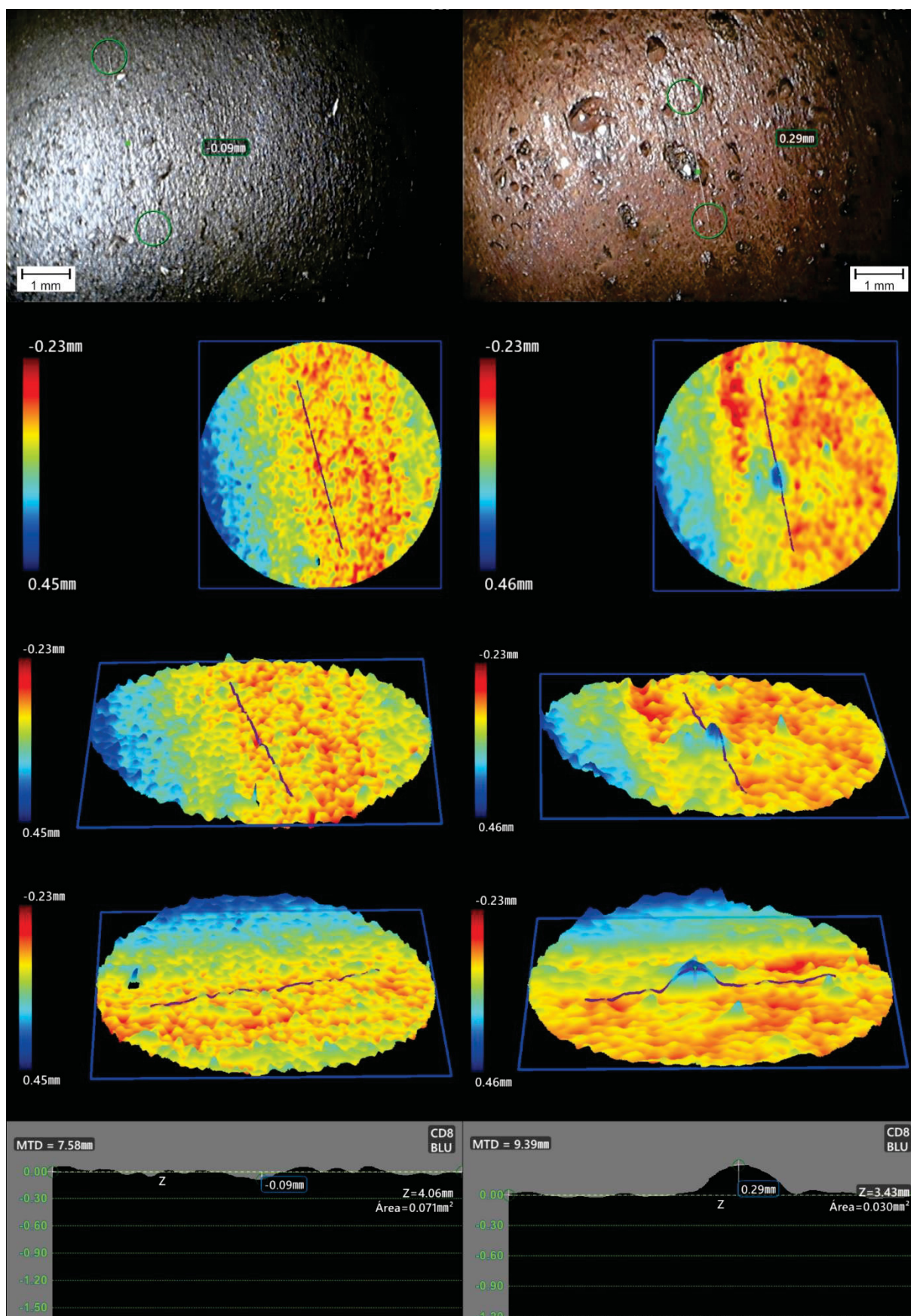
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 41 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E02.1)



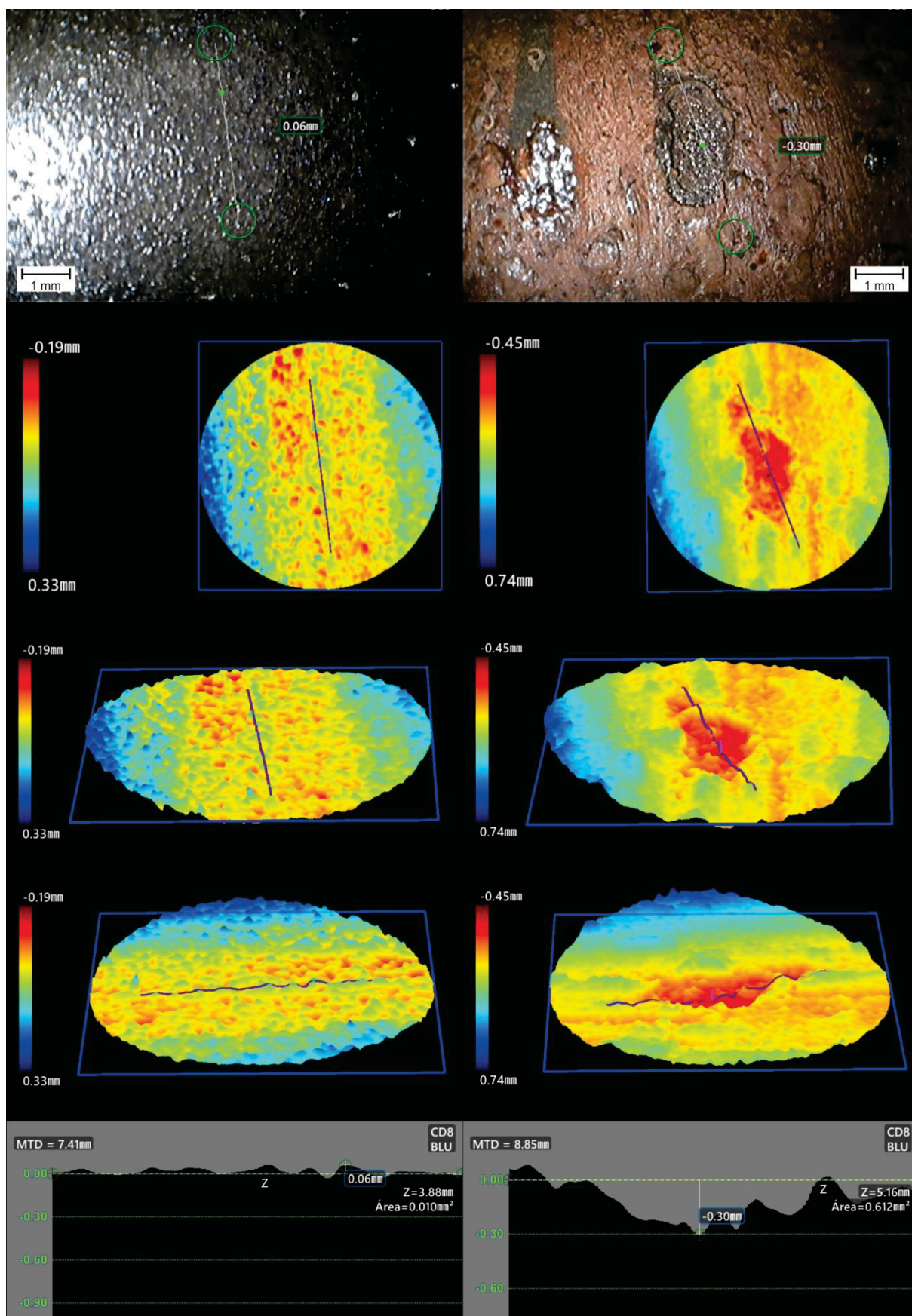
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 42 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E02.2)



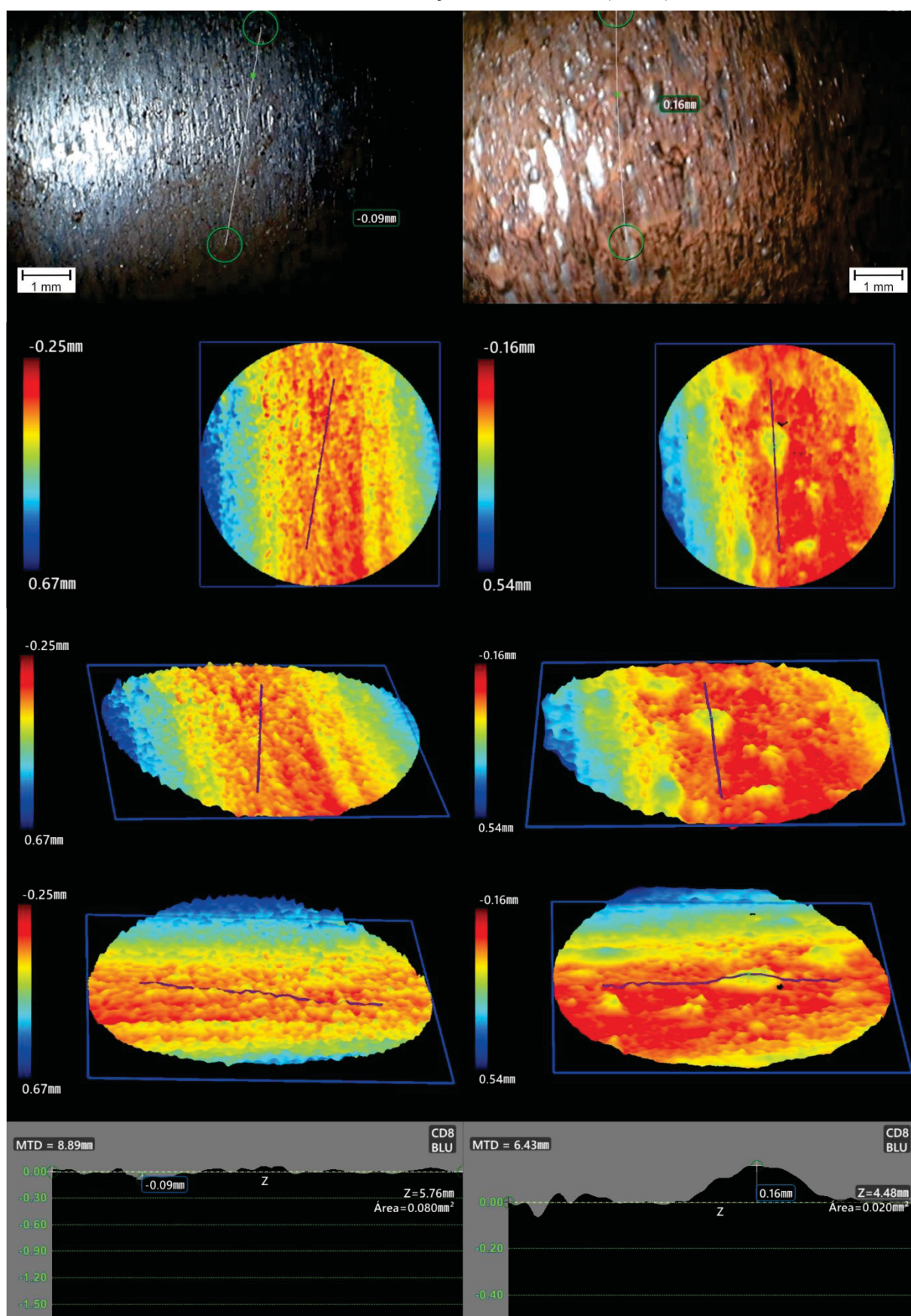
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 43 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E02.3)



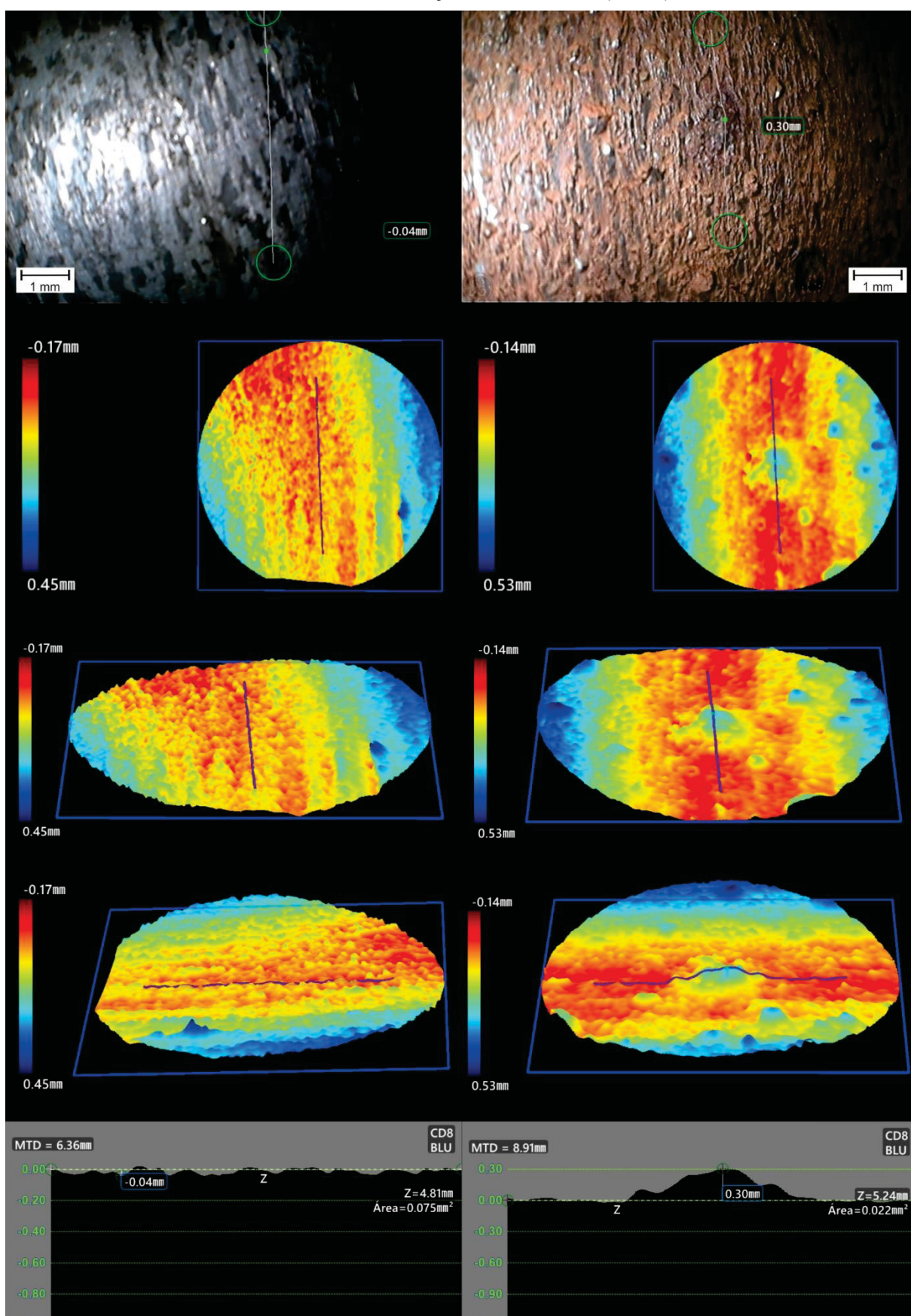
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 44 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E03.1)



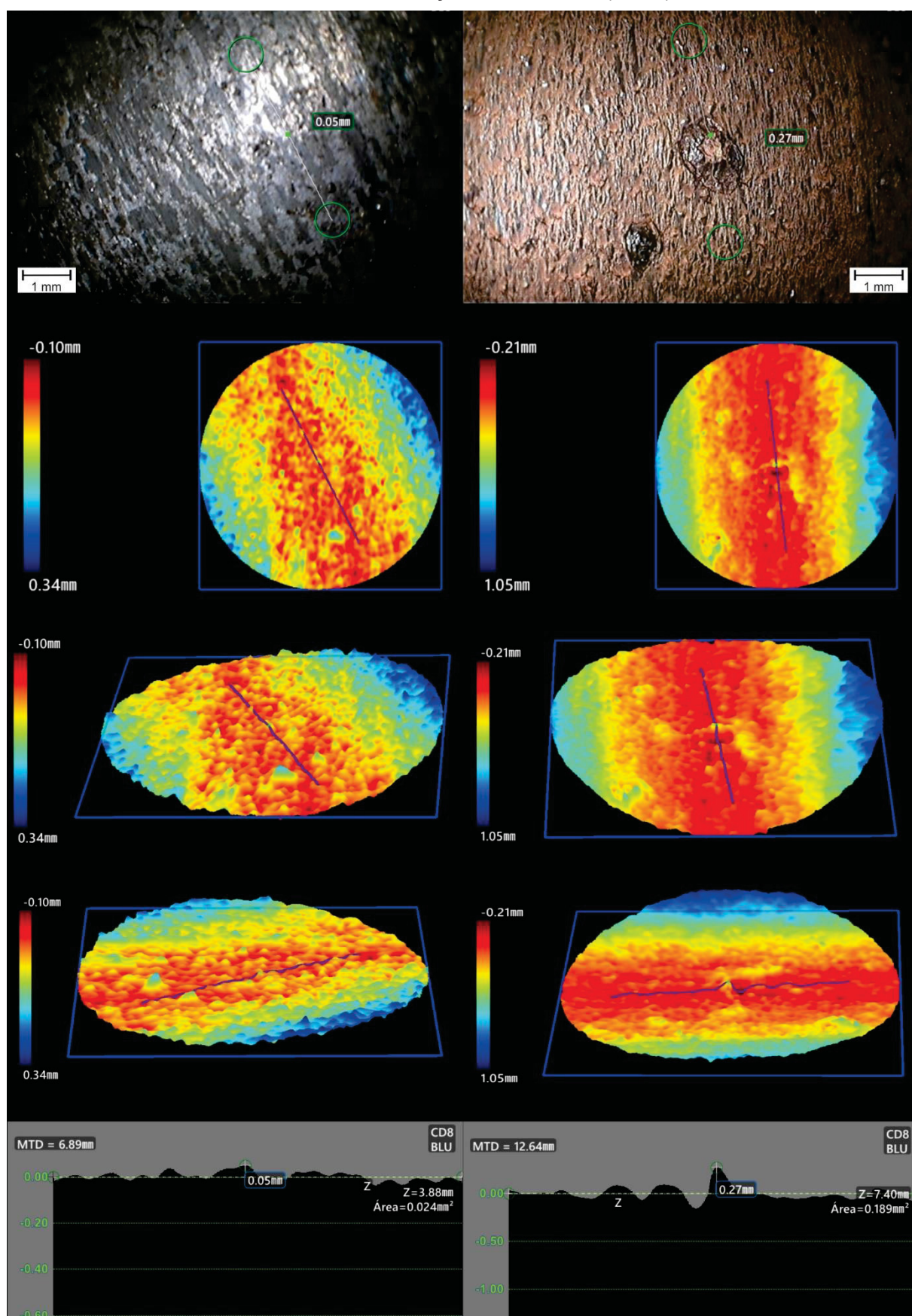
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 45 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E03.2)



FONTE: O autor (2019)

FIGURA 46 – MEDIÇÃO DE FASE 3D (E03.3)



FONTE: O autor (2019)

Nas imagens mostradas anteriormente Z representa o tamanho/comprimento analisado; MTD é a distância máxima do alvo; a Área é espaço “vazio” entre o eixo das abcissas e a parte negativa do eixo das ordenadas; e CD8 BLU são, respectivamente, o número de série e o tipo da ponteira utilizada no ensaio.

Com as análises realizadas observou-se que na entrada da seção de testes, primeira área, de todos os testes, há uma intensa formação de corrosão alveolar generalizada maior. Isso se deve a presença do oxigênio dissolvido não ser controlado durante o ensaio e devido à constrição – redução do diâmetro interno da tubulação de 60,0 mm para 32,1 mm – que produz uma elevada turbulência local. Nas outras áreas pode ser percebido uma correção alveolar menor e pontos isolados de corrosão mais severas, que na primeira área analisando a topologia da corrosão, como o deslocamento de tubérculos. Não se evidencia, morfologicamente, a corrosão acelerada pelo fluxo, devido ao processo corrosão e depósito dos íons de ferro, sendo recomendado para trabalhos futuros realizar a decapagem química antes de realizar a inspeção visual. Neste trabalho, só será analisada a degradação resultante da primeira área.

5.6.2 Ultrassom

A técnica de ultrassom utilizada para medir a camada de óxido não obteve resultados válidos para serem apresentados. Isso se deve ao fato de que a ordem de grandeza da incerteza do conjunto utilizado – considerado na literatura como sendo metade do comprimento de onda utilizada (SANTIM, 2003) – estar na mesma ordem de grandeza da faixa de medição necessária, inviabilizando a aplicação da técnica/equipamento para este trabalho em específico. Isso se deve ao tempo de ensaio ser relativamente pequeno em comparação ao equipamento de uso contínuo em que o problema de FAC ocorre. Essa técnica é normalmente usada para previsão de corrosão de componentes utilizados por períodos mais longos de tempo (NACE, 1999).

Foi utilizado também o equipamento comercial de ultrassom da *Parametrics 25DL* para realizar uma análise nos tubos ensaiados (FIGURA 47). Durante a inspeção verificou-se um problema com o acoplamento, o cabeçote detectava a espessura algumas vezes e outras não, mas pôde-se verificar que a diferença entre o tubo não íntegro e os ensaiados foi uma redução entre 10 a 20 μm .

Segundo estudos realizados por Braga (2009) e Figueiredo et al. (2018), é possível medir camadas de óxidos a partir de valores de 150 μm com alguns equipamen-

FIGURA 47 – ULTRASSOM COMERCIAL UTILIZADO



FONTE: O autor (2019)

tos de ultrassom. Para esta aplicação do ultrassom, segundo Braga (2009), devem ser verificados fatores que influenciam diretamente em erros para a medição como:

- a) A camada esfoliada ou descolada, acarretando em um dado menor do que a real espessura do óxido;
- b) Problema no acoplamento que pode gerar sinal que interfere no resultado adquirido;
- c) Camada de óxido menor que a sensibilidade do ensaio, abaixo de 150 μm .

Estes casos e outros poderão resultar em erros de medição. Isso não pode ser evitado, mas pode ser monitorado em pelo menos uma amostra metalográfica (BRAGA, 2009). Como a obtenção de dados confiáveis com a realização dos testes de ultrassom não foi possível, pelas razões comentadas anteriormente, resolveu-se fazer a análise metalográfica dos ensaios, seção 5.7.

5.7 METALOGRAFIA

Como o tempo de ensaio foi relativamente curto, em relação a tubulações que operam durante anos, o desgaste do tubo foi avaliado através da micrografia, já que a camada de óxido era delgada. Para realizar a análise da taxa de desgaste foram retiradas amostras da primeira área dos tubos ensaiados.

Para esta análise foram utilizadas amostras obtidas do corte da seção transversal da tubulação, tomando o devido cuidado para o corte sair perpendicular a direção longitudinal do tubo e não inserir erros na medição. Antes de realizar a medição foi realizada a decapagem da amostra conforme a Norma ASTM G1-03. As medidas de espessura da parede do tubo foram realizadas pelo microscópio *Olympus BX51M*.

Foram realizadas quinze de cada tubo, em diferentes pontos no tubo não ensaiado e nos tubos dos ensaios E01 a E03. Posteriormente foi realizada a comparação entre as medidas do tubo não ensaiado com os ensaiados para avaliar o desgaste.

O tamanho médio do desgaste obtido para os ensaios foram 38,3 μm , 85,1 μm , e 81,6 μm , respectivamente para os ensaios E01, E02 e E03. Com os valores obtidos na micrografia da redução de espessura e o tempo de ensaio, pôde se observar que as taxas de FAC foram elevadas (0,67, 1,49 e 1,43 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$). O que pode ocasionar o desgaste prematuro de tubos e componentes.

Com o aumento da velocidade e tensão de cisalhamento a camada de óxido se torna mais fina, degrada ou é removida completamente (BETOVA; BOJINOS; SAARIO, 2010), aumentando assim a taxa de degradação. No entanto, conforme avaliado pela micrografia o ensaio de maior velocidade apresentou uma taxa de desgaste menor, isso deve ser investigado em trabalhos futuros. A provável causa deste fato é a formação da subcamada laminar maior que nos demais ensaios.

5.8 ÓXIDO FORMADO

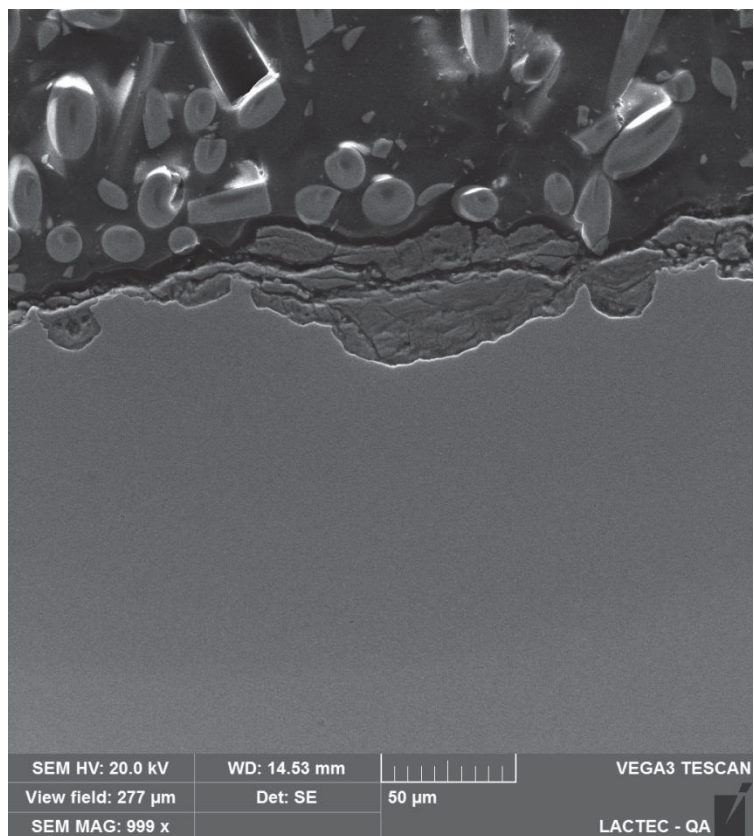
Esta seção é composta de três partes, nas quais são apresentados os resultados obtidos com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), a Espectroscopia por Energia Dispersiva de raios-x (EDS) e a Difração de Raios-X (DRX).

Para os dados do MEV e EDS foram utilizadas as mesmas quatro amostras embutidas no baquelite utilizadas na metalografia (tubo íntegro e ensaios E01, E02 e E03). Entretanto, os dados relativos à amostra do ensaio E03, não são apresentados, pois houve um problema com a amostra metalográfica durante o envio, recepção e/ou execução do ensaio da mesma.

5.8.1 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

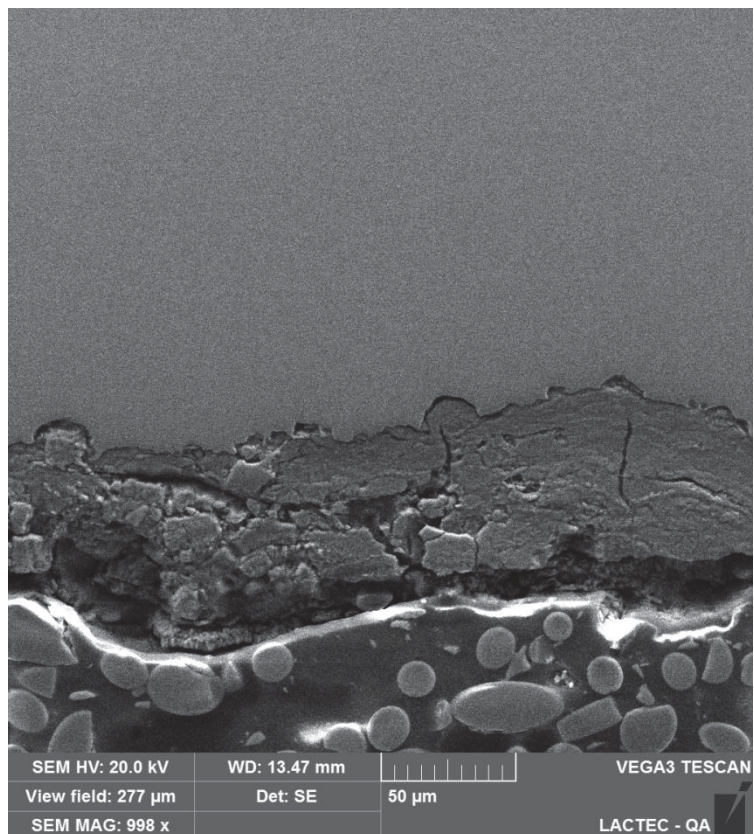
O MEV é capaz de produzir imagens de alta resolução com aparência tridimensional que são úteis para avaliar a estrutura superficial, aspectos topográficos e morfológicos, da amostra. Para a verificação do óxido utilizou-se, o modelo MEV VEGA3 da TESCAN e, uma ampliação de, aproximadamente, mil vezes (FIGURA 48, FIGURA 49 e FIGURA 50). Nas figuras pode-se perceber melhor o filme de óxido (cinza), o material de base (cinza claro) e a baquelite (cinza escuro com formas elípticas mais claras).

FIGURA 48 – METALOGRAFIA MEV TUBO ÍNTEGRO



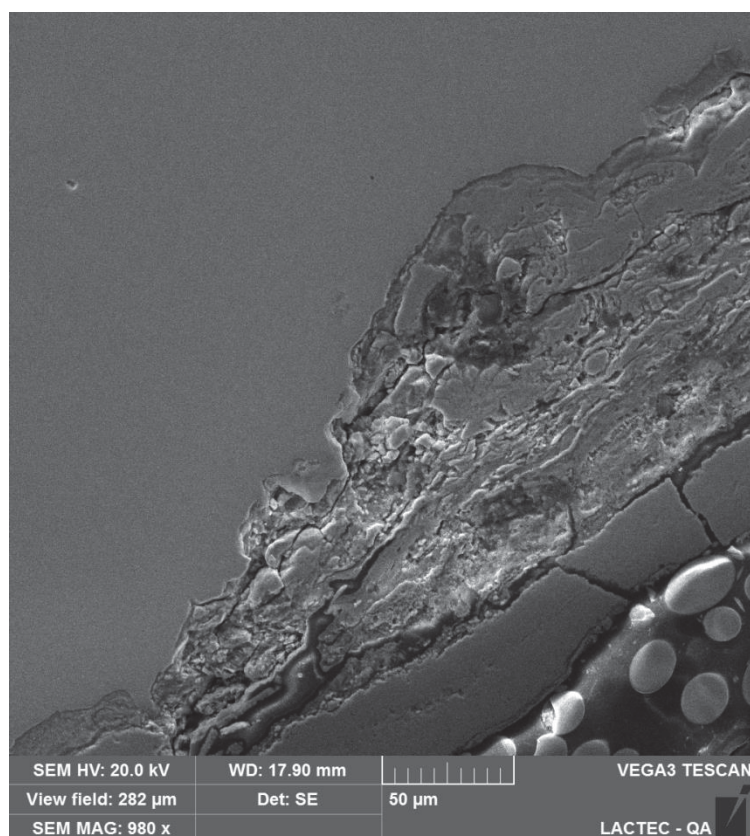
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 49 – METALOGRAFIA MEV E01



FONTE: O autor (2019)

FIGURA 50 – METALOGRAFIA MEV E02



FONTE: O autor (2019)

Na parte inferior das figuras, mostradas anteriormente, estão às informações/configurações utilizadas para a obtenção das mesmas. Sendo que SEM HV é a tensão de trabalho do microscópio; *view field* é a largura da figura obtida; SEM MAG é a ampliação usada na obtenção da figura; WD é a distância de trabalho; SE é a determinação de elétrons secundários.

Pode-se notar que a espessura do óxido é significativamente maior nas amostras que foram ensaiadas como descrito na seção 5.7. Assim como é possível verificar, visualmente, que o óxido da amostra não ensaiada apresenta ser menos poroso e quebradiço. É possível notar que na FIGURA 50 existe uma outra camada entre o óxido e a baquelite.

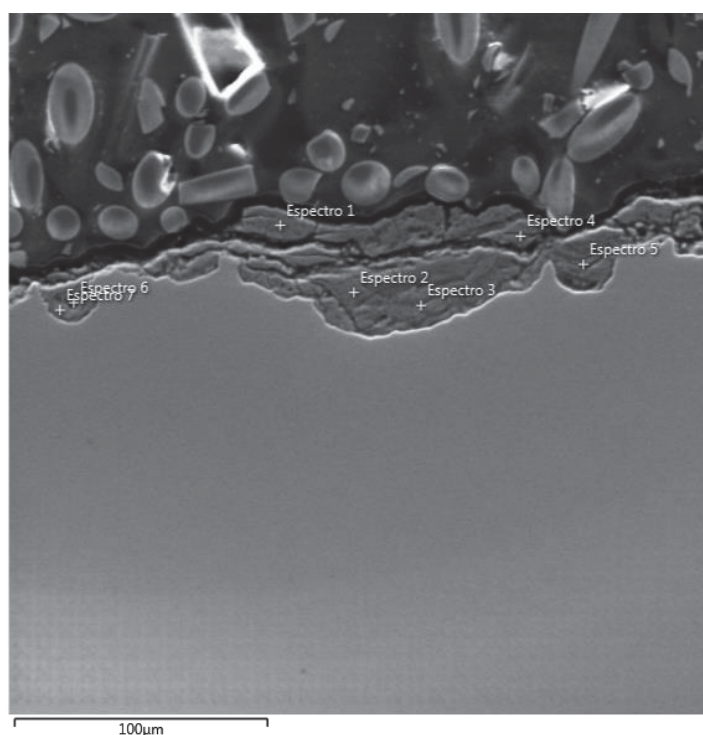
5.8.2 Espectroscopia por Energia Dispersiva de raios-x (EDS)

A EDS é um acessório/instrumento de microanálise que acoplado ao MEV é usado para identificar e quantificar, na escala microscópica, os elementos químicos presentes na amostra. A análise por EDS permite identificar a composição química, mesmo que semiquantitativo, em pontos determinados da amostra pela relação pico-

altura em relação a um padrão, sendo uma ferramenta muito importante para a caracterização de materiais (CRUZ et al., 2006; GOODGE, 2019).

A seguir são mostradas as figuras obtidas pelo MEV e os pontos/áreas (espectros) que se realizaram a identificação da composição química qualitativa utilizando a técnica EDS, os gráficos dos espectros não são apresentados, mas as tabelas a seguir mostram os percentuais em massa de cada elemento constituinte no ponto/área de análise.

FIGURA 51 – ESPECTROS EDS TUBO ÍNTEGRO



FONTE: O autor (2019)

TABELA 4 – ESPECTROS EDS TUBO ÍNTEGRO

ELEMENTO	ESPECTRO						
	1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*
C	4,55	7,83	10,07	6,49	29,20	21,28	9,53
O	40,08	40,51	46,17	42,66	33,67	38,43	40,63
Si	0,30	0,77	0,94	0,38	2,48	7,49	0,96
S	---	0,27	0,45	0,19	0,21	0,26	0,19
Fe	53,32	50,45	42,37	50,10	34,28	31,95	48,40

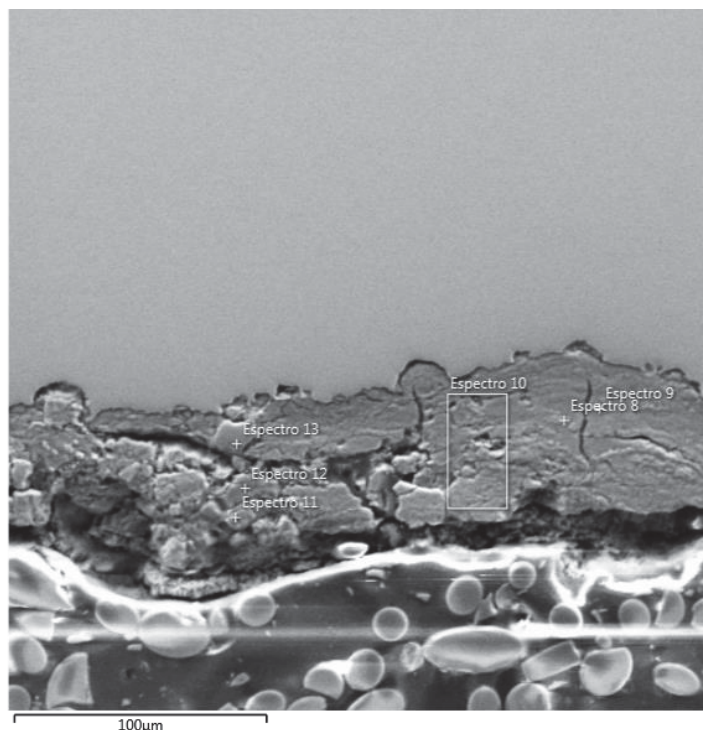
FONTE: O autor (2019)

* % em massa

Com os dados do tubo íntegro (FIGURA 51 e TABELA 4) pôde-se notar que para espectros próximos, no geral, o espectro mais perto do material de base tinha porcentagem maior de ferro e menor de carbono e oxigênio. Os percentuais que mais

oscilaram dentre os espectros foram os de carbono e ferro. A quantidade de oxigênio não oscilou muito.

FIGURA 52 – ESPECTROS EDS E01



FONTE: O autor (2019)

TABELA 5 – ESPECTROS EDS E01

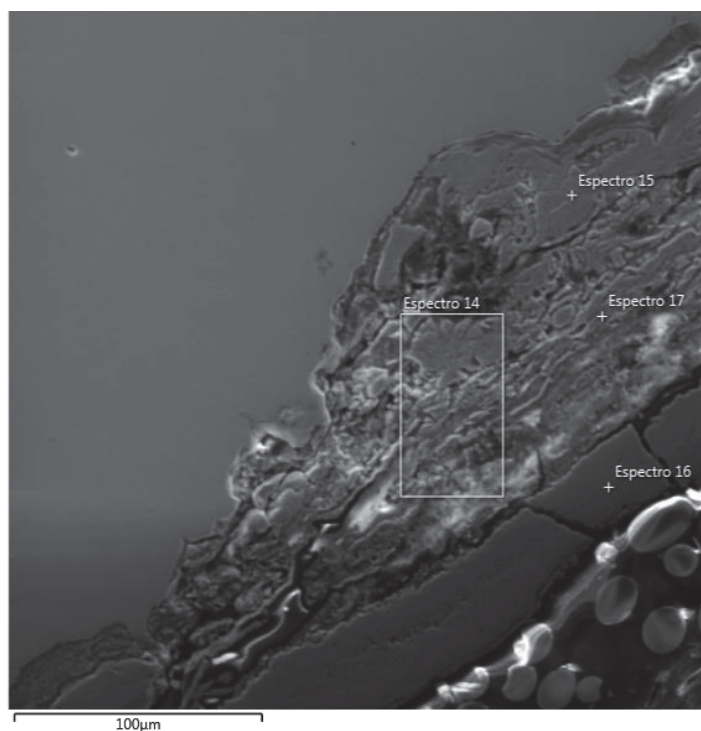
ELEMENTO	ESPECTRO					
	8*	9*	10*	11*	12*	13*
C	3,92	3,92	6,95	13,11	---	16,63
O	35,25	36,57	34,34	29,18	27,45	53,00
Si	0,76	0,87	1,32	1,05	1,19	---
Fe	60,07	58,44	57,10	56,66	71,36	30,37

FONTE: O autor (2019)

* % em massa

Verificando os dados da amostra do ensaio E01 (FIGURA 52 e TABELA 5) pôde-se perceber, em relação à amostra não ensaiada, que, em média, há nos espectros porcentagens maiores de ferro e menores de carbono e oxigênio. Os percentuais que mais oscilaram foram os de ferro e do oxigênio e não o carbono como do tubo íntegro. O espectro 12 representa uma razão mássica Fe/O, praticamente, igual ao da fórmula química da magnetita (Fe_3O_4), quando utilizado as massas atômicas do ferro e oxigênio iguais a 55,845 u e 15,999 u, respectivamente.

FIGURA 53 – ESPECTROS EDS E02



FONTE: O autor (2019)

TABELA 6 – ESPECTROS EDS E03

Elemento	ESPECTRO			
	14*	15*	16*	17*
C	16,88	---	26,69	5,06
O	53,63	23,09	71,64	31,89
S	0,16	0,87	0,02	0,26
Fe	29,14	76,05	1,51	62,48

FONTE: O autor (2019)

* % em massa

Verificando os dados da amostra do ensaio E02 (FIGURA 53 e TABELA 6) pôde-se perceber que, assim como na amostra E01, os percentuais que mais oscilaram foram os de ferro e do oxigênio. O espectro 15 representa uma razão mássica Fe/O próximo ao da fórmula química da magnetita (Fe_3O_4), quando levado em consideração as massas atômicas já mencionadas. A camada que surgiu entre o óxido e a baquelite (espectro 16) é composto em sua maioria por oxigênio e carbono. Isto se deve a esta camada formada por carbono possuir uma elevada área superficial porosa que exerce uma função adsorvente muito elevada, o que explica a alta porcentagem em massa de oxigênio na região. Esta amostra diferentemente das outras duas amostras apresenta, em média, percentuais maiores carbono e oxigênio e menores de ferro, mas isso se deve a dois fatores, primeiramente a camada de carbono citada

anteriormente e por causa do ensaio em questão ter utilizado uma velocidade de escoamento menor, possibilitando que a camada de óxido ficasse maior permitindo que houvesse uma maior difusão dos íons de ferro.

Como observado pôde-se verificar a distribuição dos elementos no óxido formado e em alguns casos foi possível inferir a formação da magnetita, objetivo da banca de testes. Entretanto, por causa da grande capacidade do carbono em adsorver o oxigênio não se pode chegar a uma conclusão sobre as fases microscópicas presentes no óxido por este motivo foi realizada a análise complementar por Difração de Raios-X (DRX).

5.8.3 Difração de Raios-X (DRX)

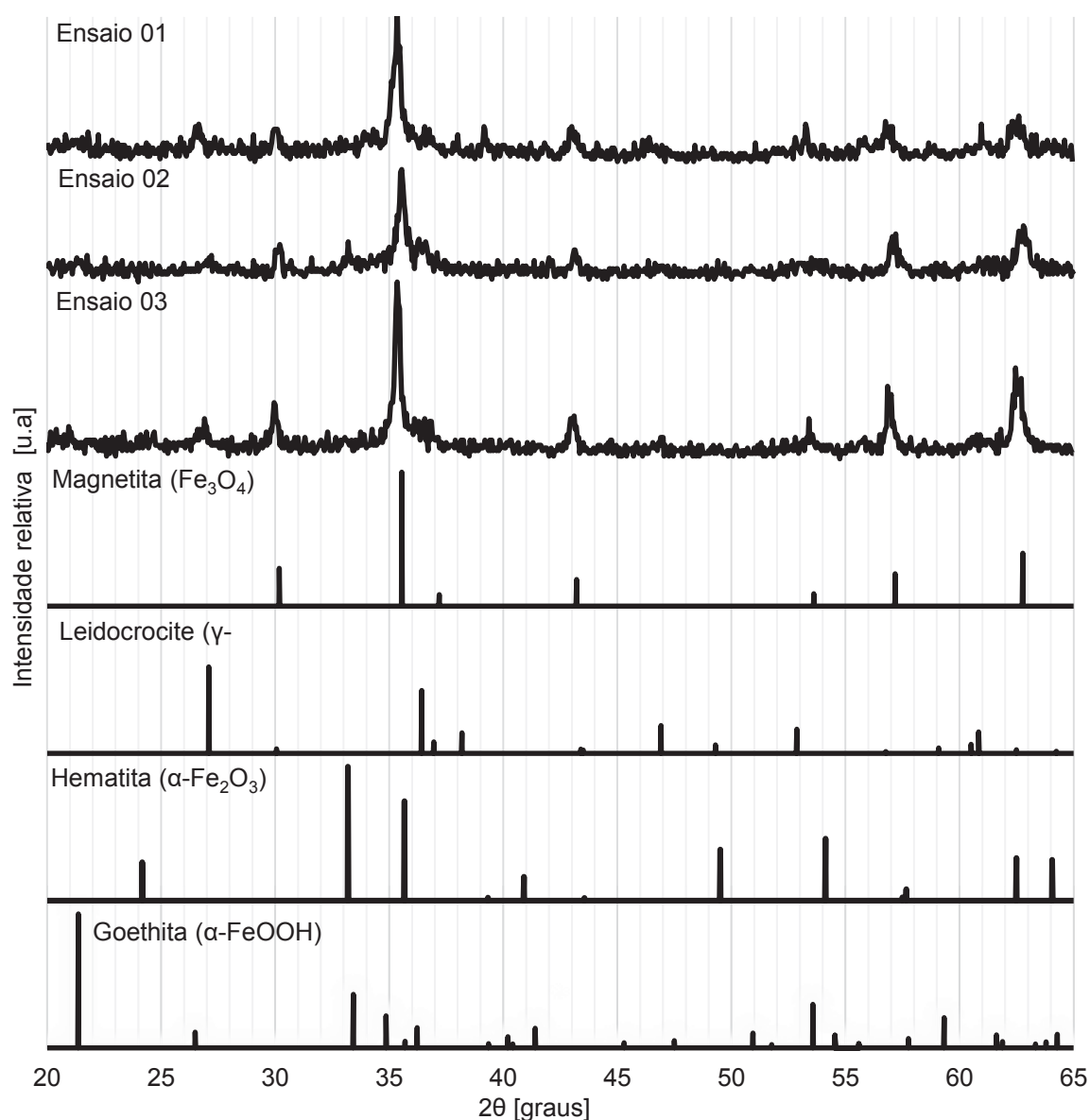
A DRX é utilizada para determinar a estrutura molecular e atômica. A técnica consiste na incidência de um feixe de raios-x em uma estrutura cristalina na qual, em razão do seu arranjo uniforme, os átomos fazem com que o feixe difrate em muitas direções específicas e formem um padrão de interferência das ondas. Medindo as intensidades e os ângulos dos feixes difratados, pode-se inferir a densidade de elétrons dentro da rede cristalina. Com base na densidade de elétrons, as posições médias dos átomos podem ser determinadas, assim como suas ligações químicas e outras informações (EDWALD, 1962; KAHN et al., 2009).

Para realizar o ensaio retirou-se uma quantidade de óxido da área 1 (ver FIGURA 37) através da raspagem do material com uma lâmina metálica. O equipamento utilizado foi o difratômetro de raios-X XRD-6000 da *Shimadzu*.

Para identificar as fases presentes utilizou-se o modelo de identificação baseado em dados, que compara os dados dos picos de difração obtidos com as de amostras padrão. A análise do material retirado dos tubos, mostrou ser uma complexa mistura de quatro principais fases, a magnetita (Fe_3O_4), a lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$), a hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) e a goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) (ver GRÁFICO 15).

Segundo Bertrand et al. (2010), em pressão atmosférica e temperaturas inferiores a 570°C , somente duas fases de óxidos de ferro seriam estáveis a magnetita e a hematita. Sendo uma camada mais espessa de magnetita e uma camada externa de hematita. A camada mais espessa da magnetita se deve as difusões do oxigênio para o interior e do ferro para fora, de modo que a camada continua crescendo mesmo com

GRÁFICO 15 – DIFRATOGRAMA DOS ENSAIOS E PADRÕES



FONTE: O autor (2019)

a superfície recoberta (BRAGA, 2009). A camada de hematita na superfície do óxido se deve a oxidação da magnetita (BETOVA; BOJINOV; SAARIO, 2010).

A fase de lepidocrocita é usualmente encontrada no óxido interno em tubos e tanques de água (BIEDERMAN et al., 2008; CHAWLA et al., 2015; LI; LIU; CHEN, 2018). Em ambientes úmidos/aquosos a interação do ferro com água e oxigênio é corroído inicialmente em lepidocrocita, isto consistente com resultados experimentais publicados (CHAWLA et al., 2015). Segundo Zhou, Zhu e Cai⁸ (2002 citado por

⁸ ZHOU, H.; ZHU, H.; CAI, L.. Corrosion inhibition of silicate in the desalination cleaning solution for iron antiques. **Sciences of conservation and archaeology**, v. 14, p. 51-62, 2002.

Chawla et al., 2015), dados históricos revelam que a formação da goethita e da lepidocrocita são favorecidas em meios com o pH de 5,0 a 7,0, enquanto valores de pH acima de 8,0 privilegiam a formação da magnetita. Como durante os ensaios utilizou-se o pH de 7,0 a 8,0, ambas as fases foram formadas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DISCUSSÕES

Nesta seção será realizada a recapitulação sintética dos resultados obtidos e suas respectivas considerações finais e discussões. Os objetivos do presente trabalho consistiam em realizar o levantamento dos modelos de predição de FAC; projetar/construir a bancada geradora de FAC; examinar a aplicabilidade das técnicas utilizadas para o monitoramento da FAC; e comparar os dados experimentais com os obtidos pelos modelos matemáticos.

Antes de comparar os dados experimentais com os teóricos e descrever sobre as técnicas empregadas no monitoramento da FAC é importante comentar da ocorrência ou não da FAC na bancada, dado que a base dessa dissertação são os dados gerados experimentalmente. E como se percebe na análise do óxido da corrosão formado pôde-se verificar a formação preferencial do óxido de ferro composto com diferentes microestruturas, como a magnetita, lepidocrocite, hematita e goethita. Como proposto, a bancada geradora de FAC conseguiu cumprir o seu propósito e produzir a FAC, pela análise do oxido formado.

Durante os ensaios houve perda do fluido em circulação devido a pequenos vazamentos e evaporação do reservatório, como comentado anteriormente. Sendo assim, necessário completar a água do sistema. A quantidade repostada de água pode ser considerada pequena, no máximo dez por cento ao longo de todo o ensaio. Entretanto, faz-se necessário mencionar isso porque estas perdas de fluido podem ter impactado na verificação do teor de íons de ferro em circulação. Por isso os gráficos mostrados anteriormente, na seção 5.4, apresentam algumas variações significativas entre um ponto de leitura e outro.

A seguir são mostrados os gráficos com o desgaste acumulado obtidos pelos modelos para cada ensaio realizado, o que permite comparar os diferentes resultados obtidos por cada modelo.

GRÁFICO 16 – COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DO MODELO SANCHEZ-CALDERA

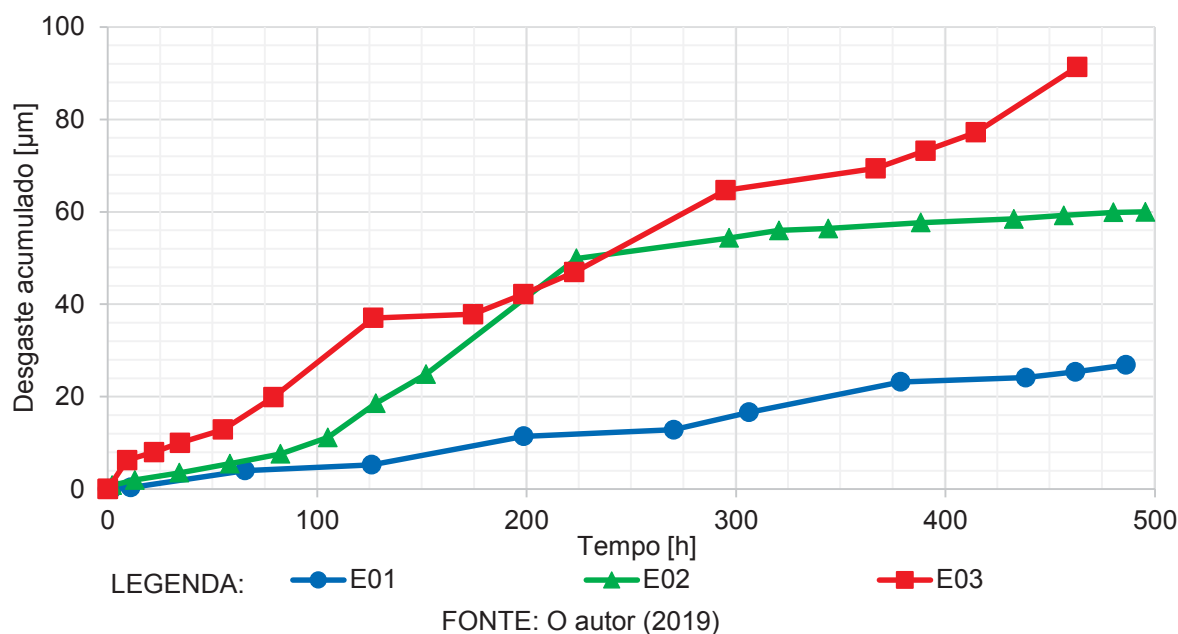
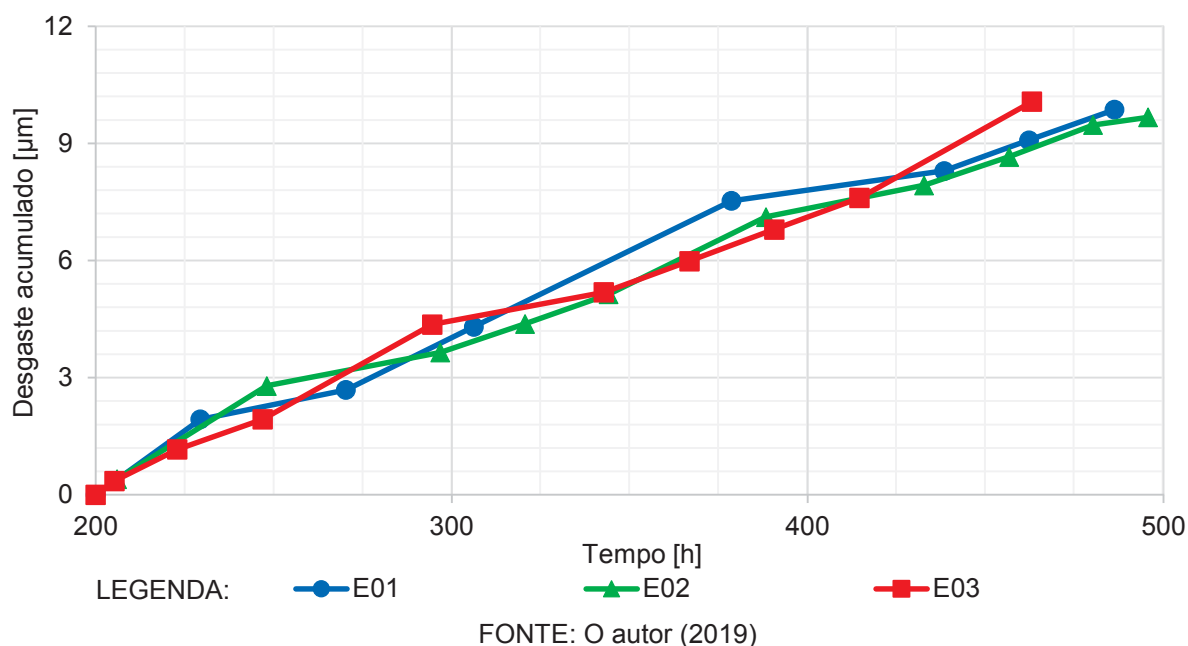


GRÁFICO 17 – COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DO MODELO KASTNER



No GRÁFICO 16, resultados do modelo Sanchez-Caldera, é possível verificar, como comentado, que a pequena variação do pH tem maior impacto na taxa de desgaste do que a variação da velocidade. O que segundo a literatura pesquisada não deveria ocorrer, isso porque em baixas temperaturas o coeficiente de transferência de massa deveria ter um peso maior e entre o pH de 6,0 a 8,0 a solubilidade de íons de ferro em função do pH é praticamente a mesma, ver seção 2.1.3.6. Nos resultados do modelo Kastner, GRÁFICO 17, é possível verificar que o modelo não sofre influência

da condição de fluxo, dado a condição que os resultados continuam praticamente os mesmos durante os diferentes ensaios.

Para poder comparar entre os modelos e os dados experimentais construiu-se a tabela a seguir:

TABELA 7 – COMPARAÇÃO TAXAS DE DESGASTE DE FAC

ENSAIO	VELOCIDADE [m·s ⁻¹]	pH	SANCHEZ-CALDERA [mm·ano ⁻¹]	KASTNER [mm·ano ⁻¹]	MICROGRAFIA [mm·ano ⁻¹]
E01	9,98 ± 0,02	7,56 ± 0,20	0,472	0,173	0,670
E02	8,75 ± 0,01	7,24 ± 0,47	1,040	0,168	1,491
E03	7,54 ± 0,01	7,16 ± 0,48	1,600	0,176	1,429

FONTE: O autor (2019)

Analisando os resultados experimentais com os obtidos pelos modelos não é possível inferir uma correlação entre eles. Entretanto deve se comentar que não foi realizada a decapagem ou retirada do óxido pré-existente do corpo de prova, podendo essa situação ter provocado algum erro. Isso pelo fato do óxido ser oriundo do processo de fabricação do duto, sendo diferente do considerado pelos modelos. Além disso analisando os gráficos das seções 5.4 e 5.5 é possível inferir que houve uma mudança no mecanismo de corrosão desgaste a partir de 150 a 200 horas de ensaio, provavelmente a partir daí que o óxido pré-existente foi degradado e se iniciou o processo de FAC. Por esse motivo recomenda-se realizar o pré tratamento da superfície interna do duto de ensaio, em ensaios futuros. Outro cuidado que deve se ter é o isolamento de componentes de materiais diferentes, aços inox e carbono, em contato com o fluido que podem interferir no potencial de oxirredução durante o ensaio. No final da seção de testes, janela de inspeção, foi usada uma conexão galvanizada, mas após o ensaio E00 o revestimento interno, em contato com o fluido, foi removido, não necessitando realizar o isolamento do componente.

7 CONCLUSÕES E PRÓXIMOS TRABALHOS

Embora seja apresentado nos modelos matemáticos que a degradação devido à FAC é previsível e gerenciável, ainda existem preocupações devido às incertezas envolvidas nas técnicas de inspeção e nos modelos de predição. Devido à complexidade dos processos envolvidos durante a manutenção/inspeção o conservadorismo não deve ser comprometido, pois os métodos/modelos desenvolvidos para localizar/avaliar a taxa de perda de espessura não são infalíveis. Mas estes métodos podem ser continuamente evoluídos/aprimorados, conforme o banco de dados sobre o tema crescer. Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões alcançadas juntamente com as sugestões para estudos futuros.

7.1 CONCLUSÕES

- a) A bancada de FAC cabe melhorias, mas desempenhou bem o seu propósito de gerar a FAC;
- b) A metodologia utilizada precisa ser melhorada, se tratando da preparação da amostra a ser utilizada (decapagem do óxido pré-existente e preparação da superfície); controle maior do fluido utilizado (potencial de oxirredução); e realizar a decapagem antes de analisar a inspeção visual;
- c) As técnicas de monitoração da corrosão indiretas (pH, velocidade e pressão do escoamento, temperatura e análise de íons metálicos) têm grande sensibilidade na indicação da ocorrência da FAC. Entretanto, não há como saber se a mesma é distribuída ao longo da seção de teste ou localizada, sendo difícil sem uma correlação, de antemão, saber a severidade da mesma. Já com as técnicas de monitoração diretas (exame visual e ultrassom) é possível avaliar a severidade das partes examinadas, contudo as aplicações dessas técnicas são limitadas. Dentre as técnicas utilizadas para o monitoramento da corrosão, não há uma em específico que abranja todas as necessidades e se destaque das demais, mas como constatado o conjunto de técnicas utilizadas simultaneamente fez com que os pontos negativos de uma fossem compensados pelos pontos positivos de outra;
- d) A aplicabilidade dos modelos não foi possível ser confirmada devido a não remoção do óxido pré-existente. Entretanto pode-se perceber que a concepção

dos modelos foi para a condição da FAC em temperatura elevada onde a maior influência é a difusão/dissolução dos íons ferro diferentemente da FAC em baixa temperatura em que é a taxa transferência de massa.;

- e) Com a análise da corrosão, por DRX, pôde-se perceber a ocorrência da lepidocrocita que usualmente não é considerada/citada na literatura, por causa do fluido ter o pH neutro;
- f) Os modelos teóricos possuem o potencial de melhorar nossa capacidade de prever a FAC e os seus complexos processos implícitos. Por isso, faz-se necessário produzir mais experimentos sobre o assunto, com o intuito de melhorá-los. Já os modelos empíricos possuem o objetivo principal de encontrar respostas imediatas, o que pode conduzir a resultados errados, pois não descrevem as relações de sinergia e/ou complexa interação dos processos envolvidos e qualquer extrapolação do modelo é imprudente.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS

Durante a realização da revisão de literatura, projeto da bancada geradora de FAC, levantamento/escolha dos modelos matemáticos, realização dos ensaios, análise dos dados coletados, foram percebidos possíveis aprofundamentos a serem realizados futuramente para dar sequência ou expandir em temas correlatos, esses pontos são:

- a) Realizar uma quantidade maior de ensaios;
- b) Formular uma equação de predição para a FAC em baixa temperatura e pH neutro;
- c) Avaliar o impacto da microestrutura na FAC;
- d) Aprimorar a bancada geradora de FAC, com um trocador de calor (maior controle da temperatura seção 5.2), além da instalação de medidores em tempo real das propriedades do fluido;
- e) Utilizar mais técnicas de monitoramento de corrosão durante o ensaio;
- f) Relacionar a taxa de FAC com a rugosidade superficial interna do tubo, com a possibilidade de expandir a análise para a perda de carga do fluido ao passar pela tubulação (seção 5.3), com diferentes níveis de desgaste;
- g) Detectar e determinar a taxa de FAC pela análise do fluido (seção 5.4);
- h) Analisar a influência do regime de escoamento na FAC (seção 5.6.1);

- i) Pesquisar e analisar quais os tipos de ultrassom que melhor se aplicam no monitoramento dessa problemática (seção 5.6.2);
- j) Analisar o impacto do processo de fabricação do material na espessura do óxido formado (seção 5.7);
- k) Verificar a troca de calor entre o tubo e o ambiente (parte externa) devido à formação do óxido, que contém propriedades isolantes;
- l) Correlacionar simulações por CFD com os ensaios e possibilidades verificar a possibilidade de expandir a análise para um sistema preditivo;
- m) Utilizar uma abordagem fluido-estrutura para constatar se há melhora na acurácia da predição de FAC;
- n) Monitorar a FAC pelo método não destrutivo de emissão acústica;
- o) Acompanhar e monitorar a FAC em campo, podendo ser em uma tubulação com maior suscetibilidade à ocorrência da FAC ou através de um *bypass* da linha principal;
- p) Verificar a aplicabilidade de um algoritmo genético para a predição;
- q) Utilizar água desmineralizada no teste e realizar o tratamento do fluido durante o ensaio;
- r) Verificar a influência das condições do fluxo (laminar, transição e turbulento) na taxa de desgaste da FAC;
- s) Verificar o impacto da rugosidade na tensão de cisalhamento do fluido;
- t) Avaliar o impacto da subcamada laminar na taxa de FAC;
- u) Verificar o impacto/resistência das fases goethita e lepidocrocita na taxa de FAC.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 6591:2008 - Tubos de aço-carbono com solda longitudinal de seção circular, quadrada, retangular e especial para fins industriais - Especificações. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)**, p. 14, 2008.

AHMED, W. H. Evaluation of the proximity effect on flow-accelerated corrosion. **Annals of Nuclear Energy**, v. 37, n. 4, p. 598–605, 2010. Elsevier Ltd.

AHMED, Z.; ABDUL ALEEM, B. J. Review and Application of Closed-Loop Systems in Flow-Induced Corrosion ~ Honeywell i Model /. OOC Pinch- Type Valve. , v. 3, n. June, p. 393–402, 1994.

AL-OTHMANY, D. Estimation of Flow Accelerated Corrosion (FAC) in Feeder Pipes using CFD Software Fluent. **Advances in Physics Theories and Applications**, v. 21, p. 4–9, 2013.

ALLOY, L.; PLANTS, N. P. Flow Accelerated Corrosion (FAC) of Carbon Steel and Low Alloy Steel Piping in Commercial Nuclear Power Plants. **OECD-NEA**, v. Junho, n. June, p. 0–85, 2014.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultrassom - aplicação industrial**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos (ABENDI), 2014.

ASM Handbook - Volume 1 Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. 10^o ed. Novelty, OH , EUA: ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, 1990.

ASTM. E3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens 1. **ASTM Copyright.**, v. i, n. Reapproved 2017, p. 1–12, 2011.

ASTM. E230 / E230M - 17 Standard Specification for Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples. **ASTM Copyright.**, 2017.

BACZONI, A.; COMPANY, N.; ILLARIO, O. Dynamic Heat Recovery Steam Generator systems stress management to maximize their lifetime. **PowerGen MiddleEast**, p. 1–14, 2014.

BERTRAND, N.; DESGRANGES, C.; POQUILLON, D.; LAFONT, M. C.; MONCEAU, D. Iron oxidation at low temperature (260-500 °c) in air and the effect of water vapor. **Oxidation of Metals**, v. 73, n. 1–2, p. 139–162, 2010.

BETOVA, I.; BOJINOV, M.; SAARIO, T. Predictive modelling of flow-accelerated corrosion – unresolved problems and issues. **Technical Research Centre of Filand (VTT)**, p. 0–53, 2010. Espoo, Finland.

BIEDERMAN, J. A.; BORCH, T.; CAMPER, A. K.; et al. Evaluation of Characterization Techniques for Iron Pipe Corrosion Products and Iron Oxide Thin Films. **Journal of Environmental Engineering**, v. 134, n. 10, p. 835–844, 2008.

BIGNOLD, G. J.; WHALEY, C. H.; GARBETT, K.; WOOLSEY, I. S. Mechanistic aspects of erosion - corrosion under boiler feedwater conditions. **Water Chemistry**

of **Nuclear Reactor Systems 3**. p.219–226, 1983. London: Thomas Telford Publishing.

BRAGA, R. M. **Medição de camada de óxidos em tubos de superaquecedores de caldeiras aquatubulares por ultrassom**, 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BRITTON, T. Advancements in Remote Visual Measurement Technology. **GE Inspection Technologies**, p. 1–73, 2015.

CARVALHO, L. The Facts and a Few Urban Legends Too Around Flow-accelerated Corrosion. **Corrosion**, , n. 9165, p. 1–7, 2017. New Orleans: NACE International.

CHAWLA, V.; GURBUXANI, P. G.; BHAGURE, G. R. Corrosion of Water Pipes: a Comprehensive Study of Deposits. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, v. 11, n. 05, p. 479–492, 2015.

CONTECH. Manual Técnico - Medidor de Vazão Eletromagnético CTH. Disponível em: <<http://contechind.com.br/>>. Acesso em: 17/11/2017.

CROCKETT, H. M.; HOROWITZ, J. S. "LOW TEMPERATURE" FAC. **ASME**, , n. PVP2009-78029, p. 1–10, jul. 2009. Praga, Republica Tcheca.

CRUZ, H.; GONZALEZ, C.; JUÁREZ, A.; HERRERA, M.; JUAREZ, J. Quantification of the microconstituents formed during solidification by the Newton thermal analysis method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 178, n. 1–3, p. 128–134, 2006.

DAIBER, J. Technical Bulletin - Update on Flow Accelerated Corrosion (FAC). **Vogt Power International Inc.**, 2004. Louisville, KY.

DIN 50920 - Corrosion of Metals. **Deutsches Institut für Normung (DIN)**, v. 1, p. 10, out. 1985. Berlin.

DOOLEY, R. B. Flow-Accelerated Corrosion. **Corrosion**, , n. 347, p. 1–12, 1999.

DOOLEY, R. B. Guidelines for Controlling Flow-Accelerated Corrosion in Fossil and Combined Cycle Plants. **EPRI**, p. 154, 6. dez. 2006. Palo Alto, California, EUA.

DOOLEY, R. B. Flow-Accelerated Corrosion in Fossil and Combined Cycle / HRSG Plants. **Power Plant Chemistry**, v. 10, n. 2, p. 68–89, 2008.

DOOLEY, R. B.; SHIELDS, K. J.; SHULDER, S. J.; et al. EPRI 's Guideline on Chemistry for Fossil Units with Air-cooled Condensers (ACCs). **EPRI**, p. 1–16, jun. 2009.

ECIL. Termopares. Disponível em: <www.ecil.com.br/upload/produto/pdf/termopares.pdf>. Acesso em: 20/6/2018.

EDWALD, P. P. **Fifty Years of X-Ray Diffraction**. Munich: Springer Science & Business Media, 1962.

FIGUEIREDO, V. P. R.; MOREIRA, V. E.; HASSEGAWA, O. I.; FARIA, R. F. **Método não destrutivo para medição da camada de óxido da superfície interna de tubos de caldeira**O Papel, 2018.

FORD, F. P.; SCOTT, P. M.; ROI, N. LE; COMBRADE, P.; AMZALLAG, C. Environmentally-Assisted Degradation of Structural Materials in Water Cooled Nuclear Reactors – An Introduction. **Advanced Nuclear Technology International**, , n. August, 2015.

FREITAS, B. M. DE; NETO, J. C. D. M.; SILVA, R. D. S. DA; GUSMÃO, A. R. B.; FREITAS, L. B. Microestrutura e Microdureza do Aço SAE 1020 em Diferentes Tratamentos Térmicos. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC**, p. 1–5, 2016.

FRIEND, D.; DOOLEY, R. Technical Guidance Document - 2015 Revision: Volatile treatments for the steam-water circuits of fossil and combined cycle/HRSG power plants. **IAPWS technical guidance**, v. 10, n. Julho, p. 1–32, 2015.

FUJIWARA, K.; DOMAE, M.; YONEDA, K.; et al. Correlation of flow accelerated corrosion rate with iron solubility. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, n. 11, p. 4482–4486, 2011. Elsevier B.V.

GE. 3D Measurement Handbook. **General Electric**, v. Maio, n. GEA31907B, p. 24, 2017. Disponível em: <www.gemeasurement.com>. .

GONÇALVES, L. C. **Configuração interferométrica diferencial para medição de deformação e temperatura**, 2010. Universidade da Madeira.

GOODGE, J. Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS). Disponível em: <https://serc.carleton.edu/msu_nanotech/methods/eds.html>. Acesso em: 6/2/2019.

HAN, R.; PENG, Y.; LI, H. Prediction Model for Oxidation Layer Thickness in Flow Accelerated Corrosion. Volume 1: Plant Operations, Maintenance, Engineering, Modifications, Life Cycle and Balance of Plant; Nuclear Fuel and Materials; Plant Systems, Structures and Components; Codes, Standards, Licensing and Regulatory Issues. **Anais...** . p.V001T01A009, 2014. Praga: ASME.

HANNA. **Manual de Instruções e Procedimentos - HI 991002 Medidor de pH/ORP/temperatura de faixa alargada e a prova de água**. 2012.

HANNA. **Guia para a Utilização e Manutenção do eletrodo**. 2018.

HERBERT, B. R.; OFFICER, S.; STATION, C. P. The Influence of System Design , Station Operations and Cycle Chemistry on Corrosion Product Generation and Flow-Accelerated Corrosion (FAC) at Coryton Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) Power Station. , p. 8–11, 2010.

HUIJBREGTS, W. Excel programme for calculation of FAC (Erosion Corrosion) on the basis of the publication of Kastner and Riedle in 1986. Disponível em: <<http://www.studiekern-corrosie.nl/pdf/Lezingen/65 FAC-Calculation model engels.pdf>>. Acesso em: 23/1/2018.

IEA. Key World Energy Statistics. **International Energy Agency**, 2017.

JAMES, C. N.; COPELAND, R. C.; LYTLE, D. A. Relationships between oxidation-reduction potential, oxidant, and pH in drinking water. **American Water Works Association -Water Quality Technology Conference**, p. 1–13, 2004.

JONAS, O. FAC and cavitation: Identification, assessment, monitoring, prevention. **Combined Cycle Journal**, v. Segundo Qu, n. 3, p. 1–7, 2004.

KAHN, H.; MICHAL, G. M.; ERNST, F.; HEUER, A. H. Poisson effects on X-ray diffraction patterns in low-temperature-carburized austenitic stainless steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 40, n. 8, p. 1799, 2009.

KAIN, V. Flow accelerated corrosion: Forms, mechanisms and case studies. **Procedia Engineering**, v. 86, p. 576–588, 2014. Elsevier B.V.

KAISHA, K. K. K. **Kurita Handbook of Water Treatment**. Segunda ed. Tokio: Kurita Water Industries, 1999.

KALYANASUNDARAM, P. MUKHOPADHYAY, C.; RAO, S. S. **Practical acoustic emission**. Oxford: Alpha Science International Ltda, 2007.

KASTNER, W.; ERVE, M.; HENZEL, N.; STELLWAG, B. **Erosion-Corrosion in Power Plant Piping Sytems - Calculation Code for Predicting Wall Thinning**. 1990.

KELLEY, A. D. Flow Accelerated Corrosion – Detection and Mittigation. **Corrosion**, , n. 5574, p. 1–7, 2015.

KESHTKAR, K.; NEMATOLLAHI, M.; ERFANINIA, A. CFX study of flow accelerated corrosion via mass transfer coefficient calculation in a double elbow. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 17, p. 7036–7046, 2016. Elsevier Ltd.

KIM, I. S.; HELM, M. VAN DER; BALLINGER, R. G. Flow induced material degradation in power plant secondary systems - A review. **Journal of the Korean Nuclear Society**, v. 30, n. 2, p. 148–163, 1998.

LI, M.; LIU, Z.; CHEN, Y. Physico-chemical characteristics of corrosion scales from different pipes in drinkingwater distribution systems. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 7, p. 19–21, 2018.

LISTER, D. H.; KOSHIZUKA, S.; UCHIDA, S.; et al. Evaluation of Flow Accelerated Corrosion of PWR Secondary Piping by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics. **Corrosion**, , n. 09468, p. 1–15, 2009.

MACHIELS, A.; CROCKETT, H. Investigation into Flow-Accelerated Corrosion at Low Temperatures. **EPRI**, , n. 1013474, p. 1–84, 2006. Palo Alto, California, EUA.

MACHIELS, A.; CROCKETT, H. Investigation into Flow-Accelerated Corrosion at Low Temperatures. **EPRI**, , n. 1015170, p. 1–102, nov. 2007. Palo Alto, California, EUA.

MACIEJCZYK, J. IDEA's 29th Campus Energy Conference. **Boiler Tubing Failure Reduction**, p. 1–22, fev. 2016. Austin, Texas, EUA.

MATTSSON, E. **Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers**. Segunda ed. Londres, 2001.

METZGER, M. The relationship between iron and ph. **Worldwide Drilling Resource**, v. Janeiro, p. 1, 2005.

MUHAMMADU, M.; SHERIFF, J.; HAMZAH, E. A Review of Literature for the Flow Accelerated Corrosion of Mitred Bends. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 8, p. 663–677, 2013.

NACE. Techniques for Monitoring Corrosion and Related Parameters in Field Applications. **Report**, v. Dezembro, n. 24203, p. 41, 1999.

NOËL, J. J. Effects of Metallurgical Variables on Aqueous Corrosion. **ASM Handbook - Volume 13A Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection**. 2^o ed, p.258–265, 2003. Novelty, OH , EUA: ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE.

PIETRALIK, J. M. The Role of Flow in Flow-Accelerated Corrosion under Nuclear Power Plant Conditions. **E-Journal of Advanced Maintenance**, v. 4, n. 2, p. 63–78, 2012.

PIETRALIK, J. M.; SMITH, B. A. W. CFD Application to Flow-Accelerated Corrosion in Feeder Bends. Proceedings of ICON14 International Conference on Nuclear Engineering. **Anais...** . p.1–7, 2006. Miami, Florida, USA.

PORT, R. D. Flow Accelerated Corrosion. **Corrosion**, , n. 721, p. 1–13, 1998.

POULSON, B. Predicting and Preventing Flow Accelerated Corrosion in Nuclear Power Plant. **International Journal of Nuclear Energy**, v. Outubro, p. 1–23, 2014.

REMY, F. N.; BOUCHACOURT, M. Flow-assisted corrosion: a method to avoid damage. **Nuclear Engineering and Design**, v. 133, n. 1, p. 23–30, 1992.

ROBERGE, P. R. **Corrosion Inspection and Monitoring**. New Jersey: Wiley-Interscience, 2007.

ROBINSON, J. O.; DREWS, T. Resolving Flow-Accelerated Corrosion Problems in the Industrial Steam Plant. **Corrosion**, , n. 346, p. 1–7, 1999.

SAE. J403 - Chemical Compositions of SAE Carbon Steels. , , n. 1911–06, p. 9, 2001.

SANCHEZ-CALDERA, L. E. **The mechanism of corrosion-erosion in steam extraction lines of power stations**, 1984. Massachusetts Institute of Technology.

SANTIN, J. L. **Ultra-som - técnica e aplicação**. Segunda ed. Curitiba, PR, 2003.

SARIN, P.; SNOEYINK, V. L.; LYTLE, D. A.; KRIVEN, W. M. Iron Corrosion Scales: Model for Scale Growth, Iron Release, and Colored Water Formation. **Journal of Environmental Engineering**, v. 130, n. 4, p. 364–373, 2004. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9372%282004%29130%3A4%28364%29>>. .

SCHMITT, H. G.; BAKALLI, M. Flow assisted corrosion. **Shreir's Corrosion**, , n. m, p. 954–987, 2010.

SHASHIDHAR, V.; PATNAIK, D. **Flow Accelerated Corrosion in Boilers/HRSGs**. Doha, Qatar: Elsevier, 2015.

SONG, F.; JACKSON, J.; EDMONDSON, J.; HARRISON, J. Flow Accelerated Corrosion of Carbon Steel Pipe Carrying Hot Condensate Water in a Chemical Plant. **Corrosion**, , n. 7127, p. 1–14, 2016.

SUBRAMANIAN, H.; MADASAMY, P.; KUMAWAT, H.; et al. Thin layer activation for probing flow accelerated corrosion of carbon steel. **Corrosion Science**, v. 54, n. 1, p. 45–51, 2012. Elsevier Ltd.

SWEETON, F. H.; BAES, C. F. The solubility of magnetite and hydrolysis of ferrous ion in aqueous solutions at elevated temperatures. **The Journal of Chemical Thermodynamics**, v. 2, n. 4, p. 479–500, 1970.

TOLOEI, A.; STOILOV, V.; NORTHWOOD, D. The relationship between surface roughness and corrosion. **Proceedings of ASME**, v. 2013, n. 65498, p. 1–10, 2013.

TREVIN, S. Flow accelerated corrosion (FAC) in nuclear power plant components. **Nuclear Corrosion Science and Engineering**. p.186–229, 2012.

VEPSALAINEN, M. Deposit formation in PWR steam generators. **VTT Technical Research Centre of Finland**, v. VTT-R-0013, p. 1–33, 2010a.

VEPSALAINEN, M. Deposit formation in PWR steam generators[1] M. Vepsalainen, Deposit formation in PWR steam generators, VTT Tech. Res. Cent. Finl. VTT-R-0013 (2010) 1–33. **VTT Technical Research Centre of Finland**, v. VTT-R-0013, p. 1–33, 2010b.

VEPSÄLÄINEN, M.; SAARIO, T. Magnetite dissolution and deposition in NPP secondary circuit. **VTT Technical Research Centre of Finland**, v. VTT-R-0973, p. 1–45, 2010.

VIANA, U. B. Instrumentação - Instrumentação Básica 2 - Vazão, temperatura e analítica. , 1999. Serra - Espírito Santo.

WOOD, R. J. K. Erosion/Corrosion. **Comprehensive Structural Integrity**. p.395–427, 2007. Elsevier.

YONEDA, K.; MORITA, R.; FUJIWARA, K.; INADA, F. Development of flow-accelerated corrosion prediction method (1) Acquisition of basic experimental data including low temperature condition. **Mechanical Engineering Journal - JSME**, v. 3, n. 1, p. 1–15, 2016.

ZHU, X. L.; ZHU, L. X.; LU, X. F.; LING, X. A novel method to determine flow-accelerated corrosion rate based on fluid structure interaction. **Materials and Corrosion**, v. 65, n. 11, p. 1120–1127, 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A – METALOGRAFIA E MICRODUREZA DO MATERIAL

Para fazer a análise metalográfica foi utilizada a técnica da micrografia, que consiste em um aumento no microscópio acima de cinquenta vezes. O material utilizado para realizar a micrografia foi retirado do mesmo tubo usado nos ensaios.

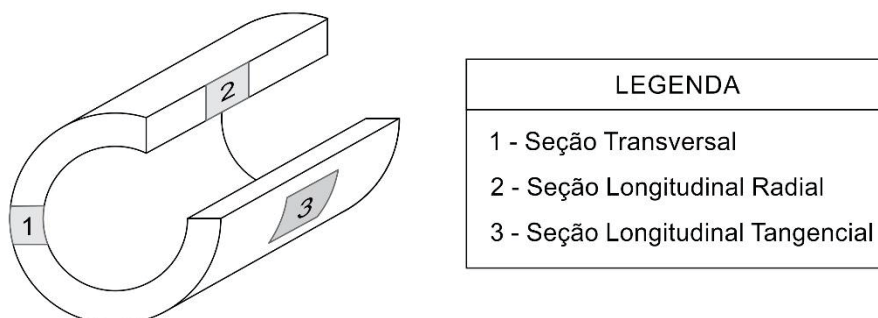
A norma ABNT NBR 6591 (2008), prevê que os tubos podem ser fabricados a partir de aços laminado a quente; laminado a frio; e laminado revestido. A norma ASTM E3-11 (2011) estabelece o posicionamento para a retirada das amostras metalográficas a ser estudada (FIGURA 54), isso varia conforme o material a ser examinado. Sendo que, para metais trabalhados a quente ou a frio, as seções transversal e longitudinal devem ser avaliadas.

A norma ASTM E3-11 (2011) estabelece as análises metalográficas nas seções transversal e longitudinal, pois elas são recomendadas para verificar diferentes aspectos do material. Portanto,

- a) O corte transversal é melhor indicado para se verificar variações na estrutura do centro até a superfície; distribuição de impurezas não metálicas pela seção; decarbonização na superfície; profundidade de imperfeições superficiais; profundidade da corrosão; espessura de revestimentos de proteção; e estrutura do revestimento.
- b) O corte longitudinal é melhor indicado para se verificar a presença de inclusões do aço; grau de deformação plástica, visualizado pela distorção do grão; presença ou ausência do bandejamento da estrutura; a microestrutura obtida por qualquer tratamento térmico.

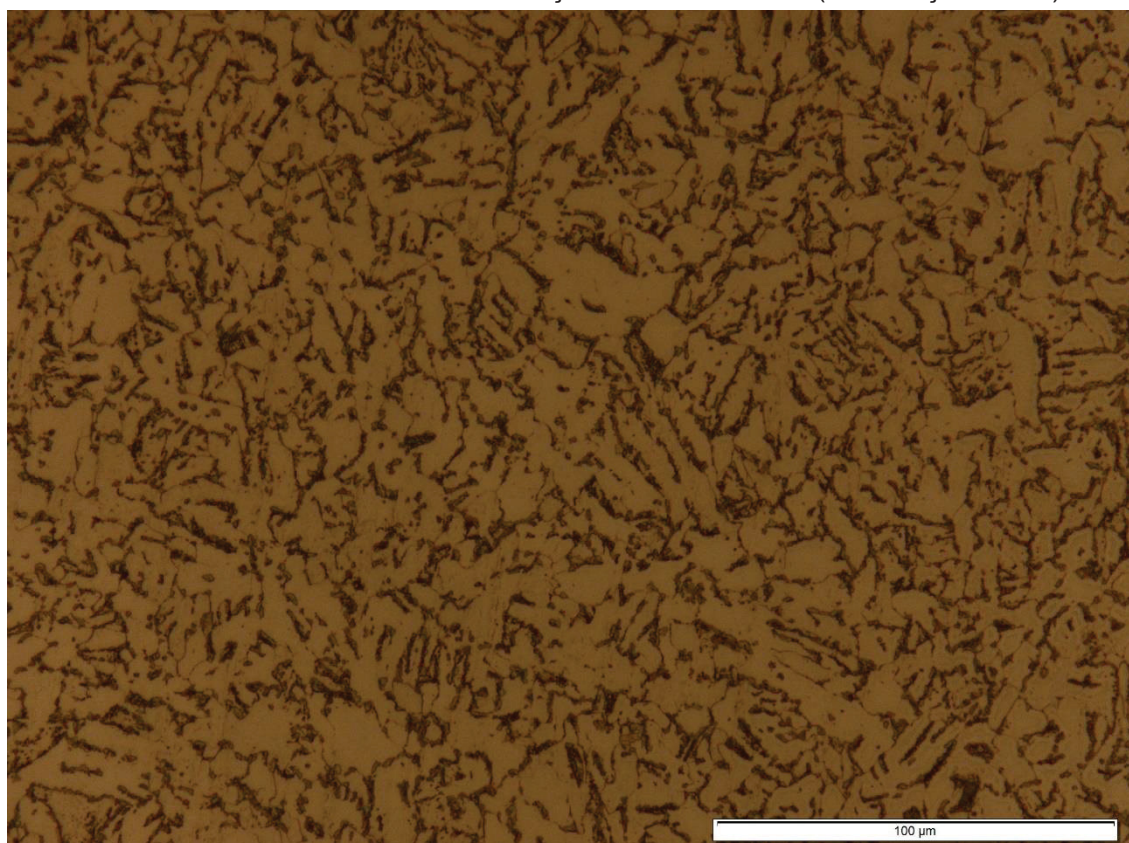
Foram analisadas a seção transversal (ver FIGURA 55) e a seção longitudinal radial (ver FIGURA 56). As metalografias foram realizadas com o microscópio Olympus BX51M.

FIGURA 54 – SEÇÕES DE CORTE METALOGRAFIA



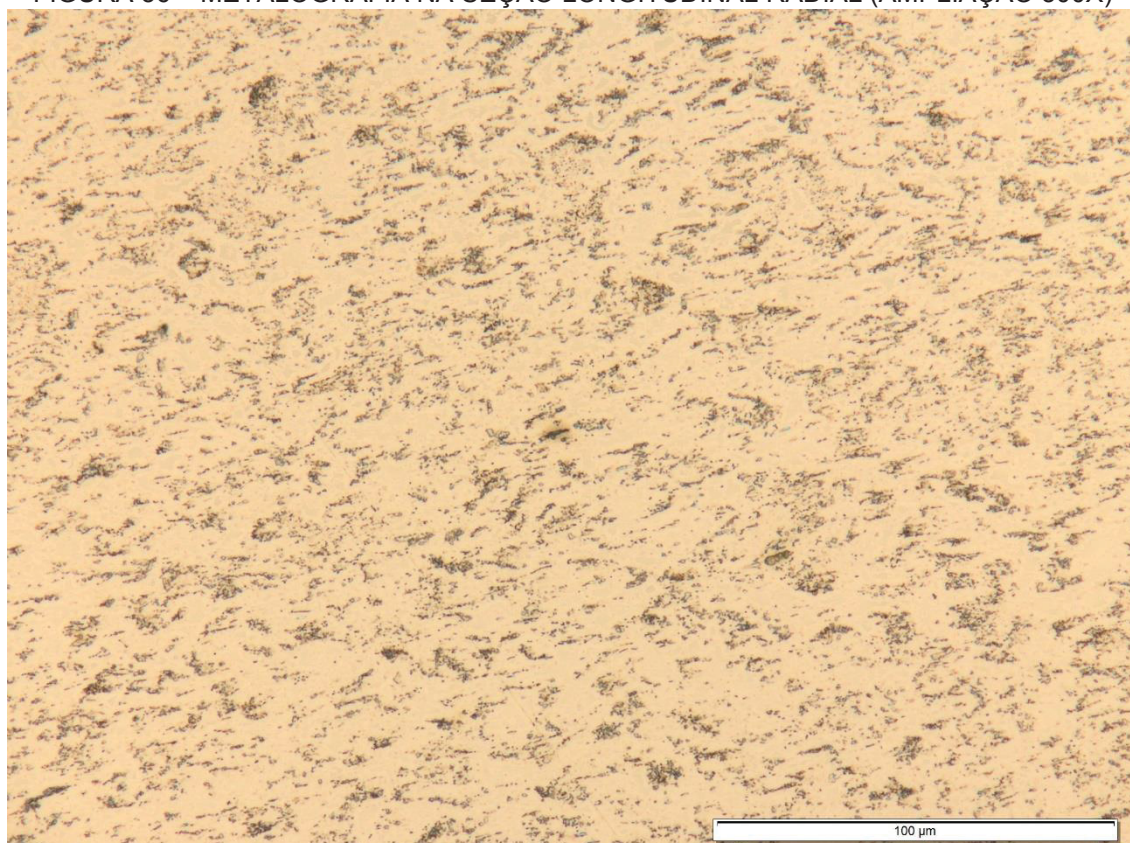
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 55 – METALOGRAFIA NA SEÇÃO TRANSVERSAL (AMPLIAÇÃO 500X)



FONTE: O autor (2019)

FIGURA 56 – METALOGRAFIA NA SEÇÃO LONGITUDINAL RADIAL (AMPLIAÇÃO 500X)



FONTE: O autor (2019)

Pode se verificar pelas metalografias que o tubo com costura utilizado nos ensaios foi fabricado de um material laminado a quente, já que os grãos não possuem a direção de laminação (achatamento do grão).

Também foi realizado medições de microdureza, para poder verificar se algum tratamento térmico foi realizado. Os dados são apresentados nas tabelas a seguir, sendo que, para cada amostra metalográfica foram realizadas medidas de microdureza no diâmetro e em pontos aleatórios. A microdureza foi realizada no equipamento EMCOTESET - DuraScan, com uma carga de HV⁹ 0,3.

TABELA 8 – MICRODUREZA SEÇÃO TRANSVERSAL (1)

MEDIDAS EM PONTOS ALEATÓRIOS					
Nº	1	2	3	4	Média
HV	155,00	170,00	148,00	154,00	156,75

FONTE: O autor (2019)

TABELA 9 – MICRODUREZA SEÇÃO TRANSVERSAL (2)

MEDIDAS NO DIÂMETRO							
Nº	0	100	200	300	400	500	Média
HV	162,00	162,00	162,00	159,00	157,00	155,00	156,75

FONTE: O autor (2019)

TABELA 10 – MICRODUREZA SEÇÃO LONGITUDINAL RADIAL (1)

MEDIDAS EM PONTOS ALEATÓRIOS					
Nº	1	2	3	4	Média
HV	171,00	176,00	169,00	175,00	172,75

FONTE: O autor (2019)

TABELA 11 – MICRODUREZA SEÇÃO LONGITUDINAL RADIAL (2)

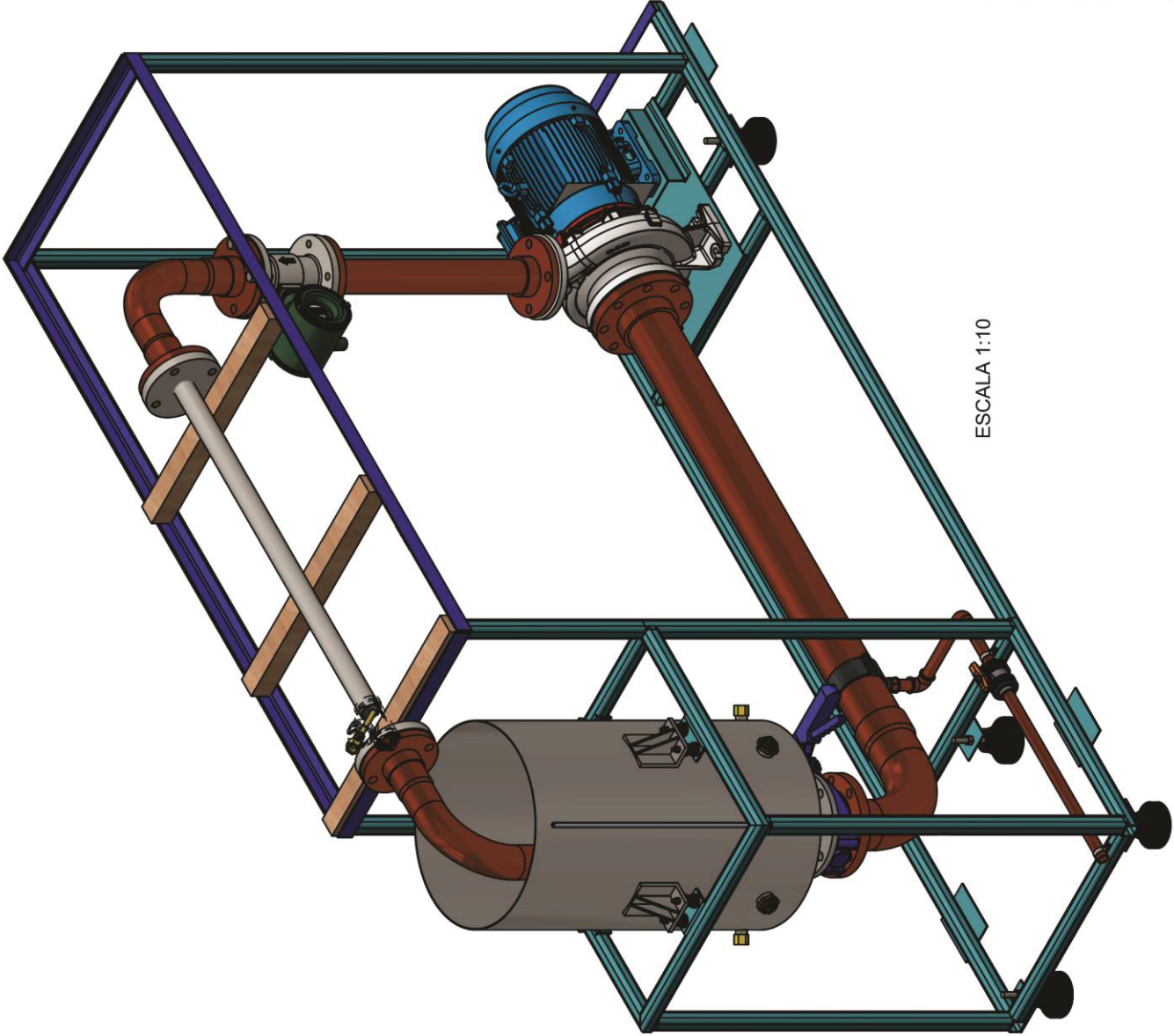
MEDIDAS NO DIÂMETRO							
Nº	0	100	200	300	400	500	Média
HV	172,00	168,00	177,00	165,00	173,00	169,00	170,75

FONTE: O autor (2019)

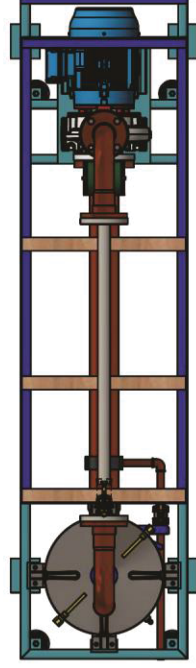
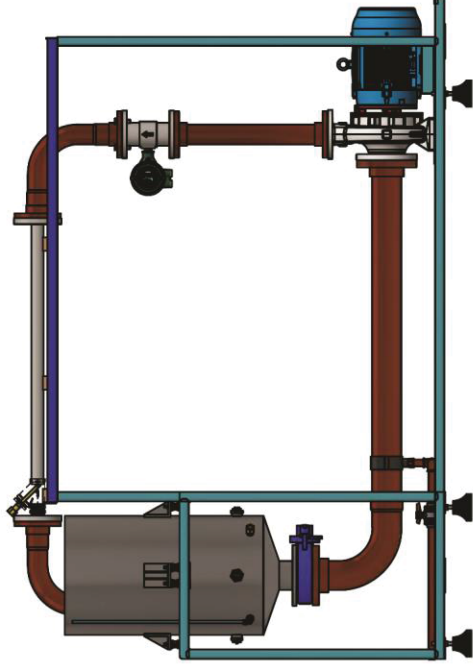
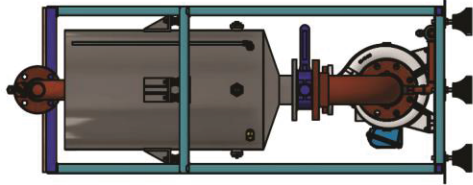
De acordo com as medidas utilizadas e o trabalho de Freitas et al. (2016), pode-se afirmar que o corpo de prova passou por um tratamento térmico semelhante à normalização, tendo a sua dureza entre 130 a 180 HV, ao longo do material.


⁹ HV – *Hardness Vickers*

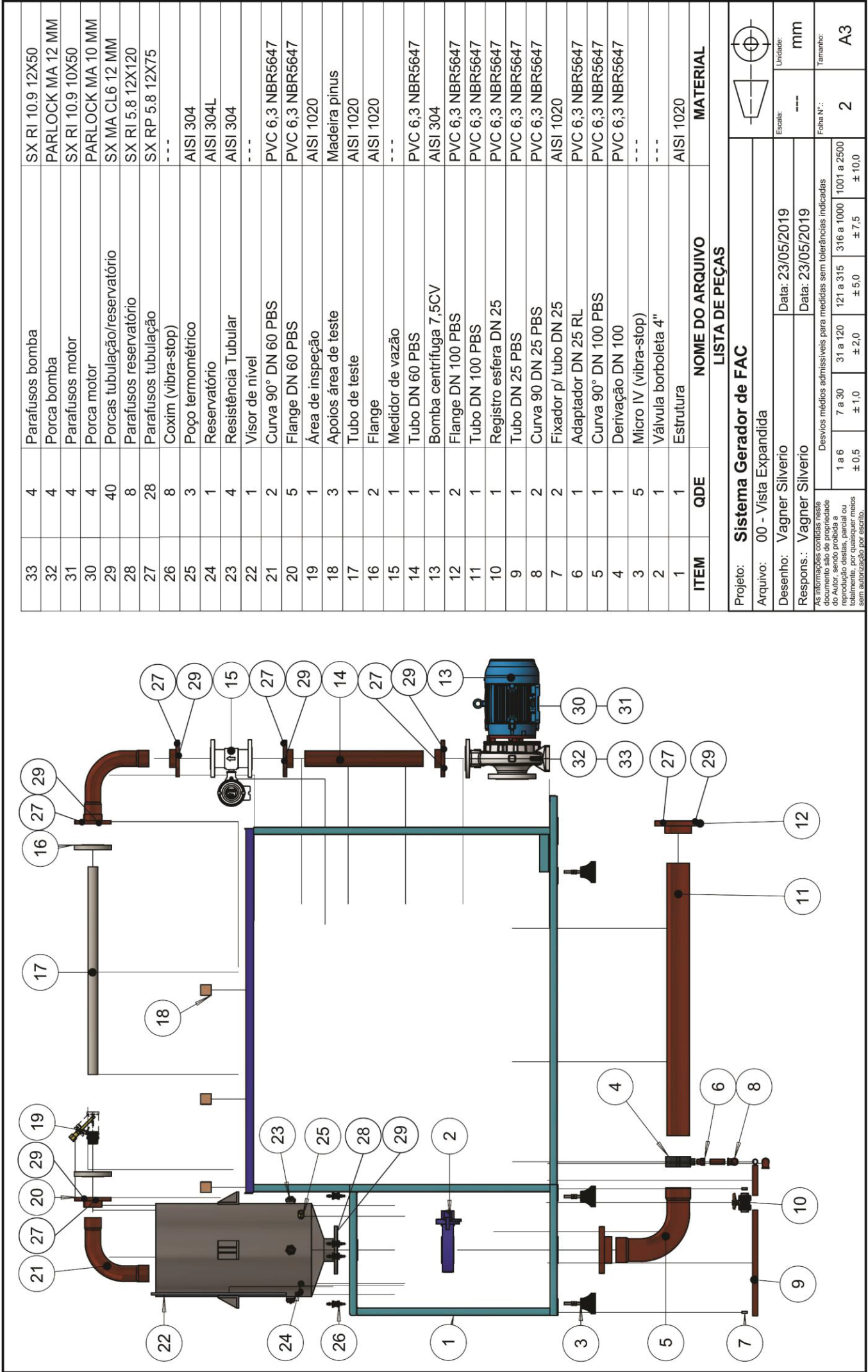
APÊNDICE B – PROJETO DO SISTEMA GERADOR DE FAC



ESCALA 1:10

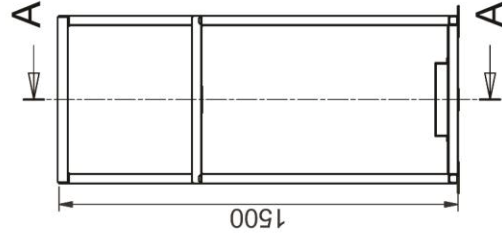
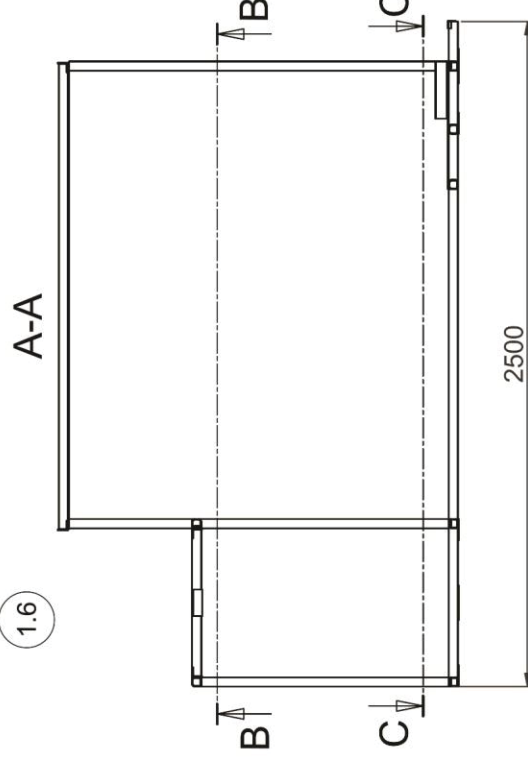
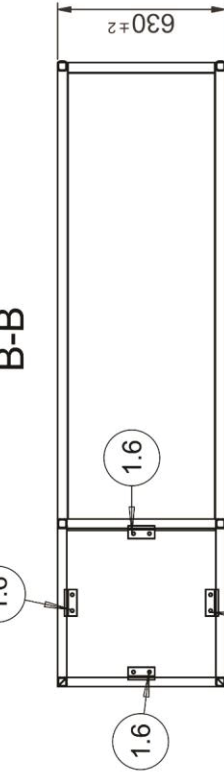


Projeto: Sistema Gerador de FAC											
Arquivo: 00 - Sistema Gerador de FAC					Unidade:						
Desenho: Wagner Silverio					Escala:	mm					
Data: 23/05/2019					1:20						
Respons.: Wagner Silverio					Tamanho:						
Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas											
1 a 6		7 a 30		31 a 120		121 a 315		316 a 1000		1001 a 2500	
± 0,5		± 1,0		± 2,0		± 5,0		± 7,5		± 10,0	
As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.											



33	4	Parafusos bomba	SX RI 10.9 12X50
32	4	Porca bomba	PARLOCK MA 12 MM
31	4	Parafusos motor	SX RI 10.9 10X50
30	4	Porca motor	PARLOCK MA 10 MM
29	40	Porcas tubulação/reservatório	SX MA CL6 12 MM
28	8	Parafusos reservatório	SX RI 5.8 12X120
27	28	Parafusos tubulação	SX RP 5.8 12X75
26	8	Coxim (vibra-stop)	---
25	3	Poço termométrico	AISI 304
24	1	Reservatório	AISI 304L
23	4	Resistência Tubular	AISI 304
22	1	Visor de nível	---
21	2	Curva 90° DN 60 PBS	PVC 6.3 NBR5647
20	5	Flange DN 60 PBS	PVC 6.3 NBR5647
19	1	Área de inspeção	AISI 1020
18	3	Apoios área de teste	Madeira pinus
17	1	Tubo de teste	AISI 1020
16	2	Flange	AISI 1020
15	1	Medidor de vazão	---
14	1	Tubo DN 60 PBS	PVC 6.3 NBR5647
13	1	Bomba centrífuga 7.5CV	AISI 304
12	2	Flange DN 100 PBS	PVC 6.3 NBR5647
11	1	Tubo DN 100 PBS	PVC 6.3 NBR5647
10	1	Registro esfera DN 25	PVC 6.3 NBR5647
9	1	Tubo DN 25 PBS	PVC 6.3 NBR5647
8	2	Curva 90 DN 25 PBS	PVC 6.3 NBR5647
7	2	Fixador p/ tubo DN 25	AISI 1020
6	1	Adaptador DN 25 RL	PVC 6.3 NBR5647
5	1	Curva 90° DN 100 PBS	PVC 6.3 NBR5647
4	1	Derivação DN 100	PVC 6.3 NBR5647
3	5	Micro IV (vibra-stop)	---
2	1	Válvula borboleta 4"	---
1	1	Estrutura	AISI 1020

ITEM	QDE	NOME DO ARQUIVO	MATERIAL
LISTA DE PEÇAS			
Projeto: Sistema Gerador de FAC			
Arquivo: 00 - Vista Expandida			
Desenho: Wagner Silverio		Data: 23/05/2019	Unidade: mm
Respons.: Wagner Silverio		Data: 23/05/2019	Folha N.º: 2
Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas			
1 a 6 ± 0,5 7 a 30 ± 1,0 31 a 120 ± 2,0 121 a 315 ± 5,0 316 a 1000 ± 7,5 1001 a 2500 ± 10,0			
Tamanho: A3			

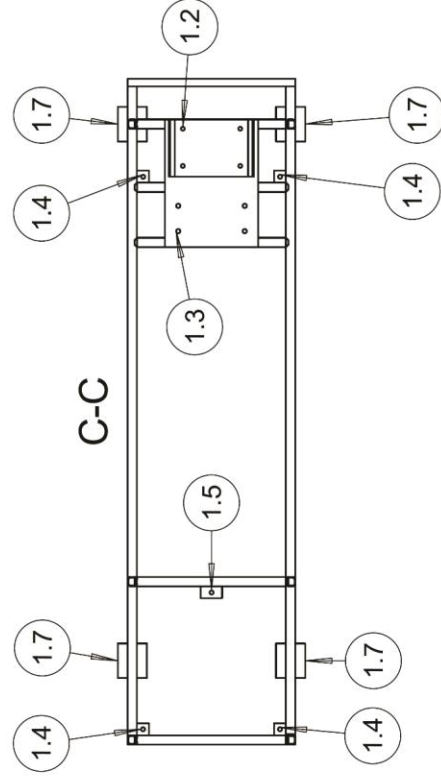
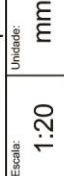


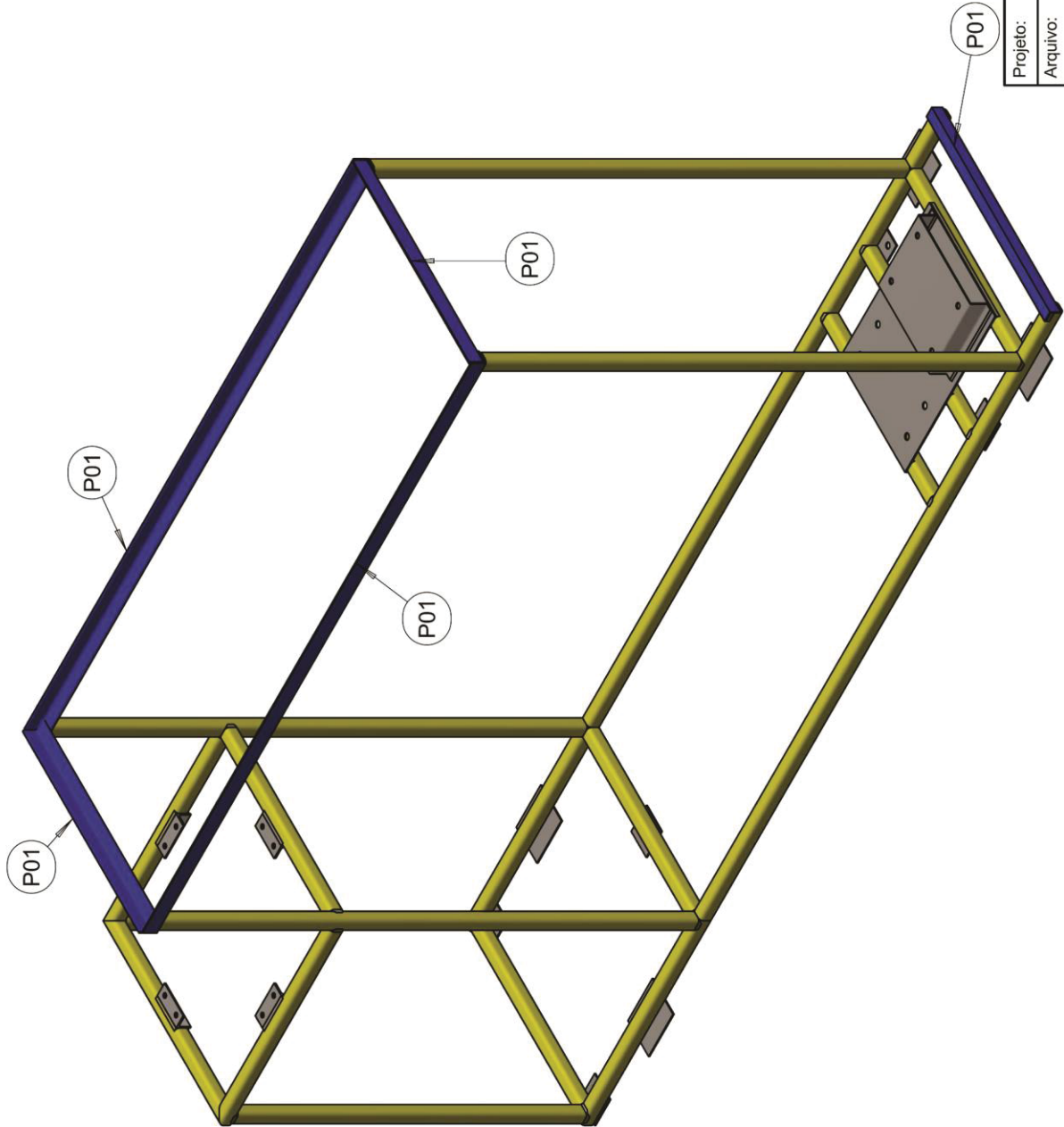
ITEM	QTDE	NOME DO ARQUIVO	DESCRIÇÃO
------	------	-----------------	-----------

Projeto: **Sistema Gerador de FAC**

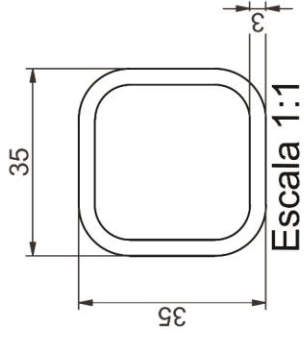
Desenho:	Vagner Silverio
Respons.:	Vagner Silverio

As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios	Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas				
	1 a 6 ± 0,5	7 a 30 ± 1,0	31 a 120 ± 2,0	121 a 315 ± 5,0	316 a 1000 ± 7,5
100					

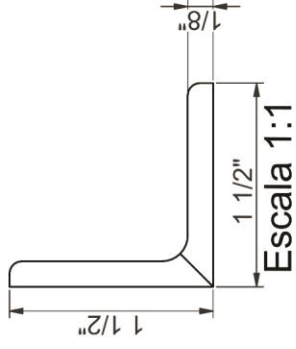




Perfil 01 (amarelo)



Perfil 02 (azul)



Projeto: Sistema Gerador de FAC

Arquivo: 01 - Estrutura

Desenho: Wagner Silverio

Respos.: Wagner Silverio

Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas			
1 a 6	7 a 30	31 a 120	121 a 315
± 0,5	± 1,0	± 2,0	± 5,0
Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas			
1001 a 2500	316 a 1000	121 a 315	± 7,5
± 10,0	± 10,0	± 10,0	± 10,0

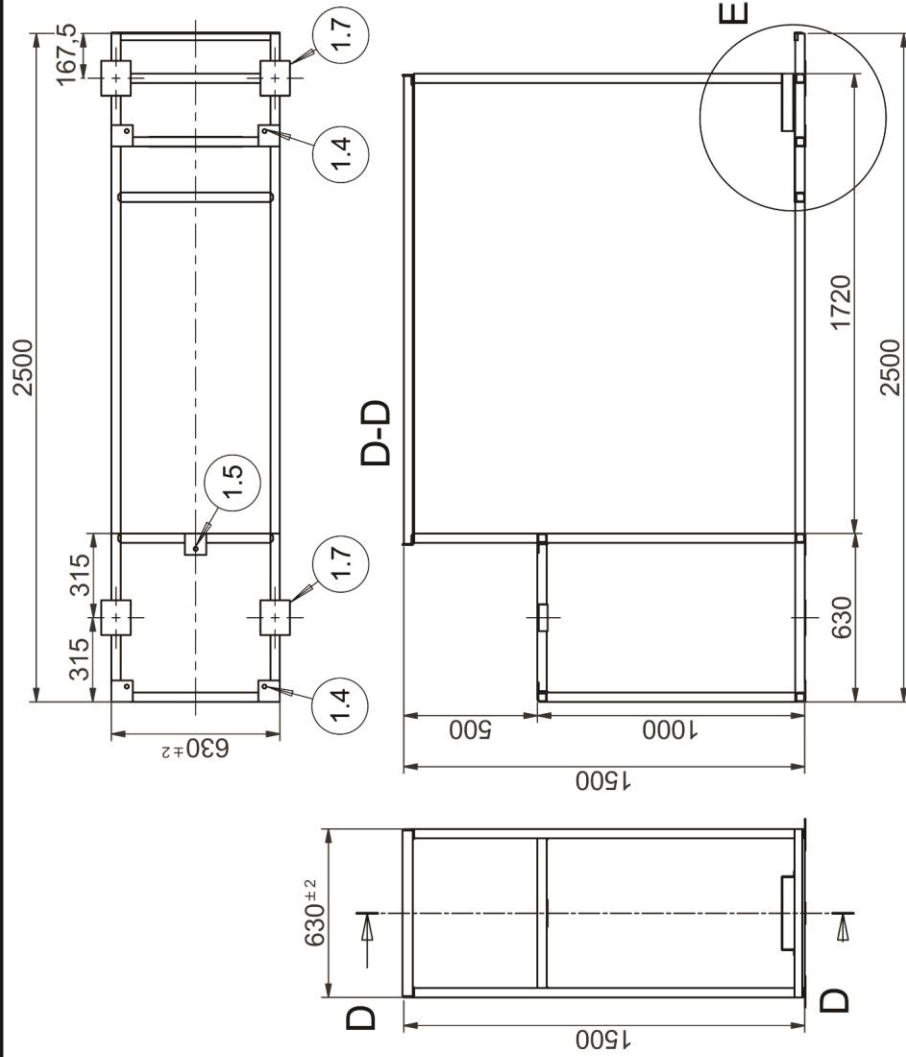


Escala: 1:20

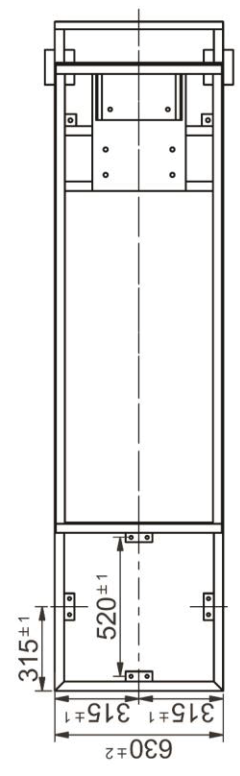
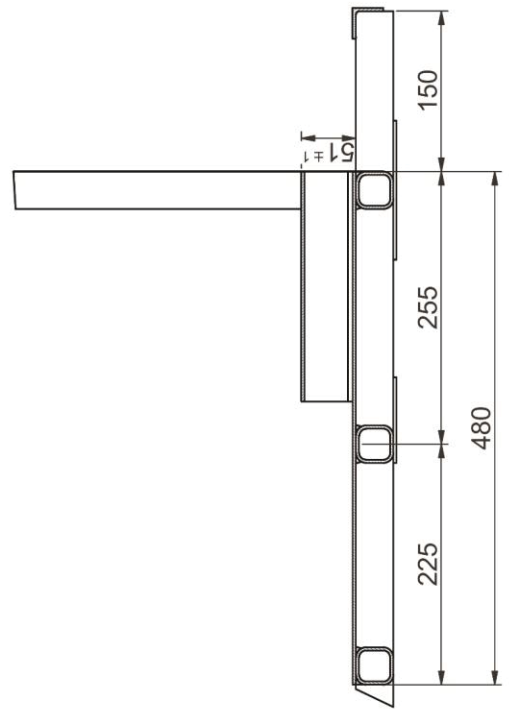
Unidade: mm


Folha N°: 4

Tamanho: A3

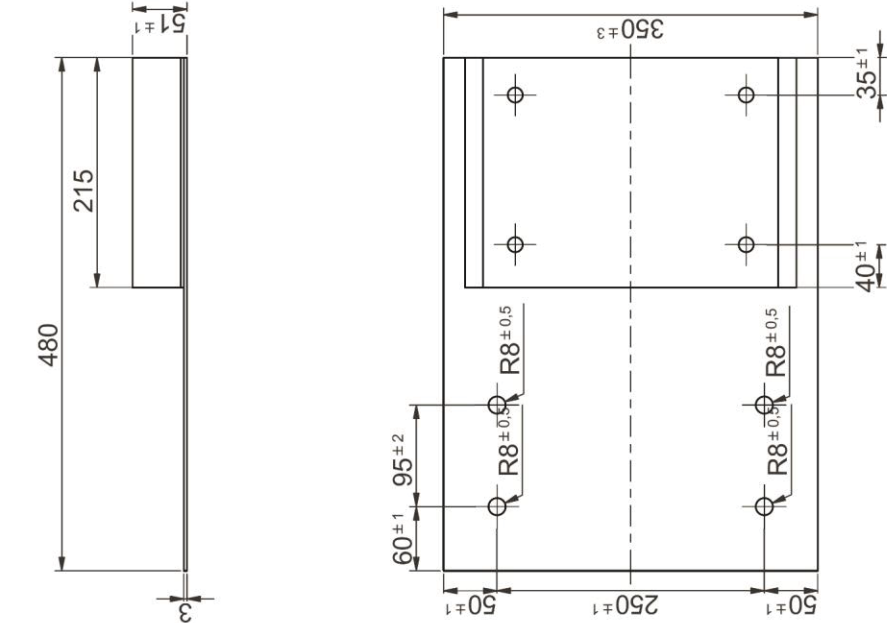


Detalhe E (1 : 5)

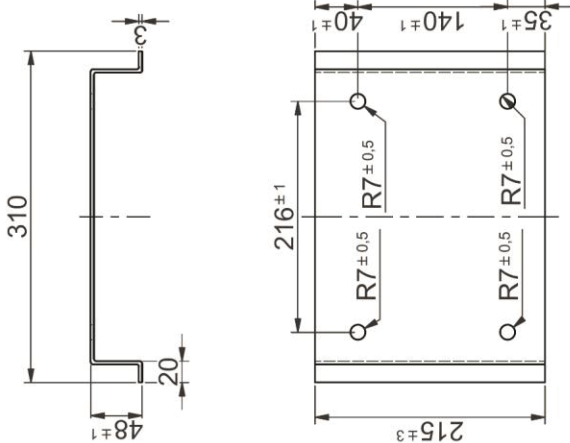


Projeto: Sistema Gerador de FAC					
Arquivo: 01 - Estrutura	Data: 23/05/2019		Escala: 1:20	Unidade: mm	
Desenho: Wagner Silverio	Data: 23/05/2019				
Respons.: Wagner Silverio	Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas				
As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução total ou parcial, por qualquer meio, sem autorização por escrito.					
1 a 6	7 a 30	31 a 120	121 a 315	316 a 1000	1001 a 2500
± 0,5	± 1,0	± 2,0	± 5,0	± 7,5	± 10,0

1.3 - BASE BOMBA

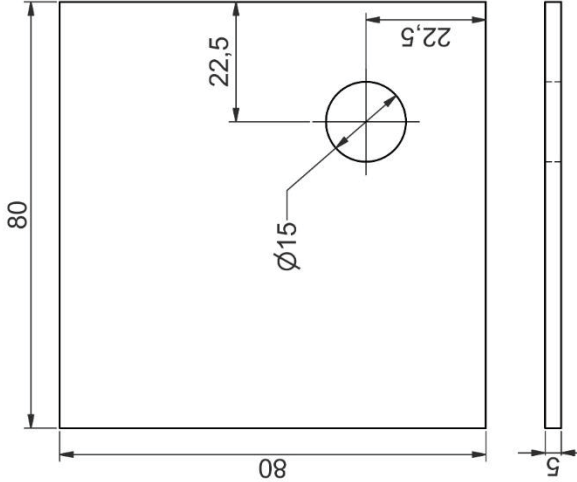


1.2 - BASE MOTOR

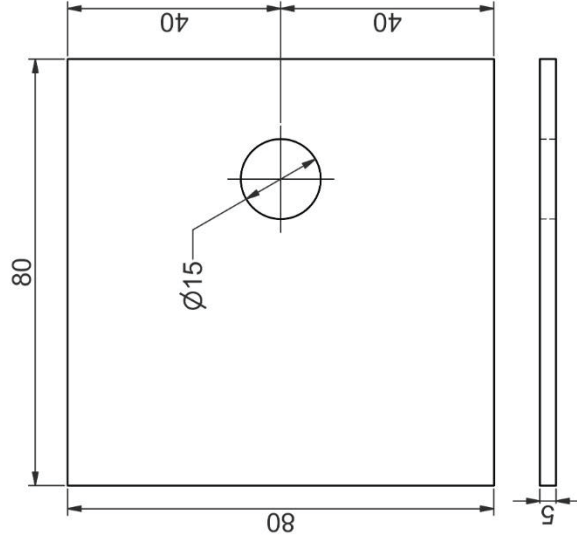


1.3	1	Base Bomba	AISI 1020 - Chapa de 3,0mm
1.2	1	Base Motor	AISI 1020 - Chapa de 3,0mm
ITEM	QTDE	NOME DO ARQUIVO	DESCRIÇÃO
LISTA DE PEÇAS			
Projeto: Sistema Gerador de FAC			
Arquivo: 01 - Estrutura Detalhes			
Desenho: Vagner Silverio		Data: 23/05/2019	Unidade: mm
Respos.: Vagner Silverio		Data: 23/05/2019	Escala: 1:5
As informações contidas neste documento são propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.			
Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas		Folha N.º:	Tamanho:
1 a 6	7 a 30	31 a 120	1001 a 2500
± 0,5	± 1,0	± 2,0	± 7,5
		121 a 315	± 5,0
		316 a 1000	± 10,0
		6	A3

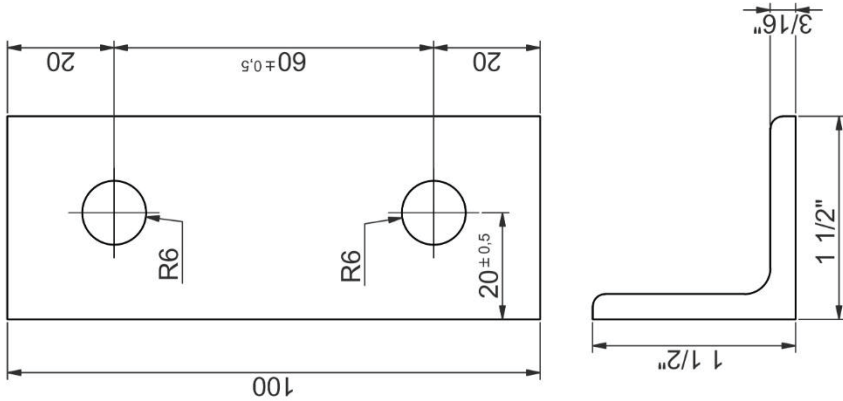
1.4 - BASE APOIO



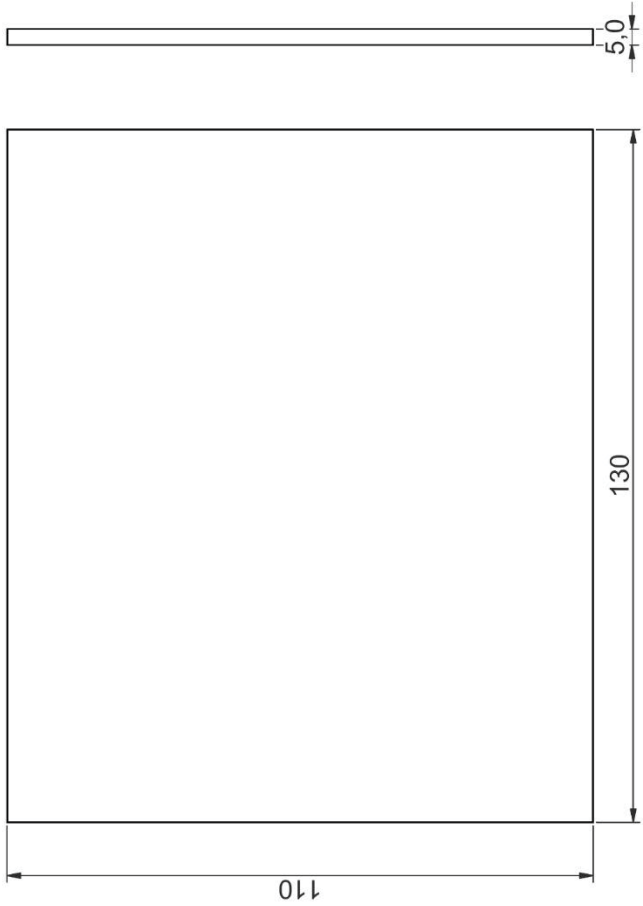
1.5 - BASE APOIO 2



1.6 - SUPORTE TANQUE

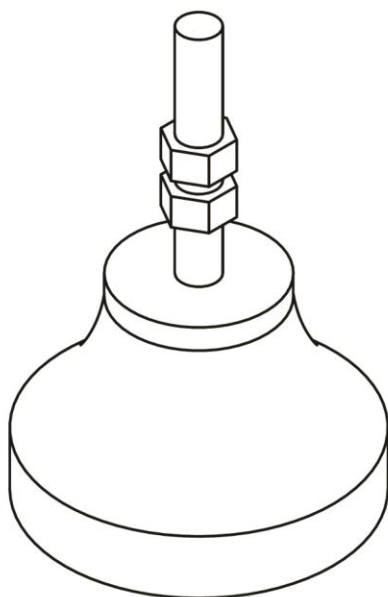
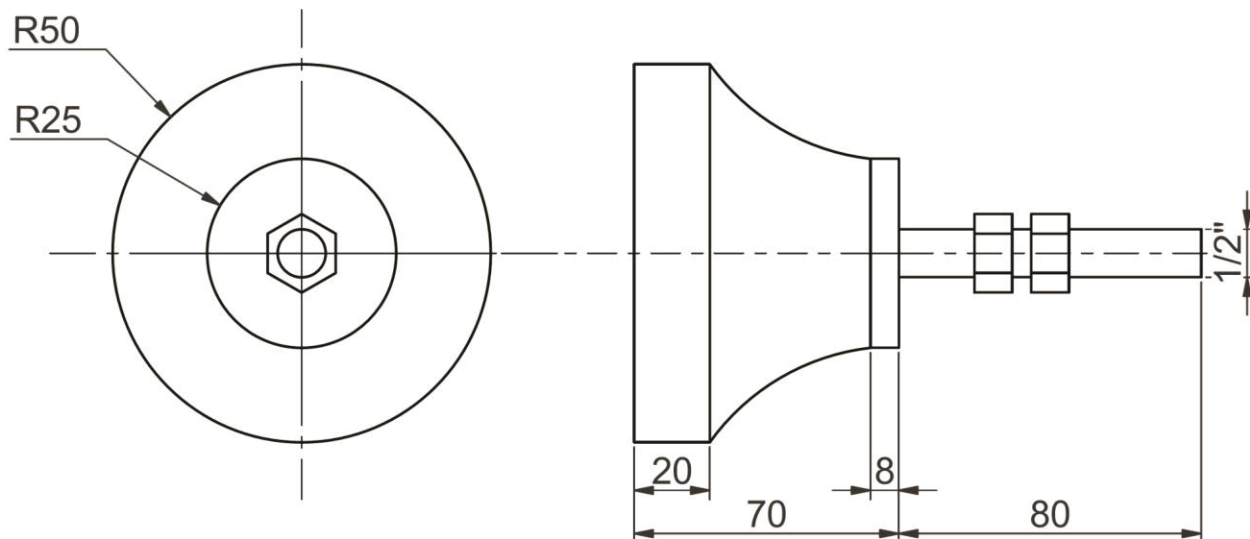


1.7 - BASE RODIZIO



1.7	4	Base Rodizio	AISI 1020 - Chapa de 5,0mm
1.6	4	Suporte Tanque	AISI 1020 - L 1 1/2"x 1 1/2" x 3/16"
1.5	1	Base Apoio 2	AISI 1020 - Chapa de 5,0mm
1.4	4	Base Apoio	AISI 1020 - Chapa de 5,0mm
ITEM	QTDE	NOME DO ARQUIVO	MATERIAL

LISTA DE PEÇAS															
Projeto:		Sistema Gerador de FAC													
Arquivo:		01 - Estrutura Detalhes													
Desenho:		Vagner Silverio		Data: 23/05/2019		Escala:		1:1							
Respons.:		Vagner Silverio		Data: 23/05/2019		Unidade:		mm							
As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.						Folha N.º:				Tamanho:					
						Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas									
						1 a 6		7 a 30		31 a 120		121 a 315		316 a 1000	
						± 0,5		± 1,0		± 2,0		± 5,0		± 7,5	
						1001 a 2500		± 10,0		± 10,0		± 10,0		± 10,0	
						7		A3							



Projeto: **Sistema Gerador de FAC**

Arquivo: 03 - Micro IV (vibra-stop)

Desenho: Vagner Silverio

Data: 23/05/2019

Respons.: Vagner Silverio

Data: 23/05/2019



Escala:

1:2

Unidade:

mm

As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.

Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas

1 a 6
± 0,5

7 a 30
± 1,0

31 a 120
± 2,0

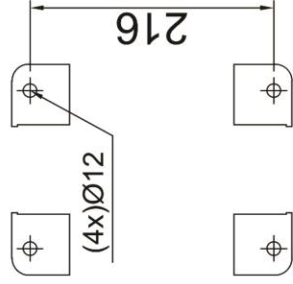
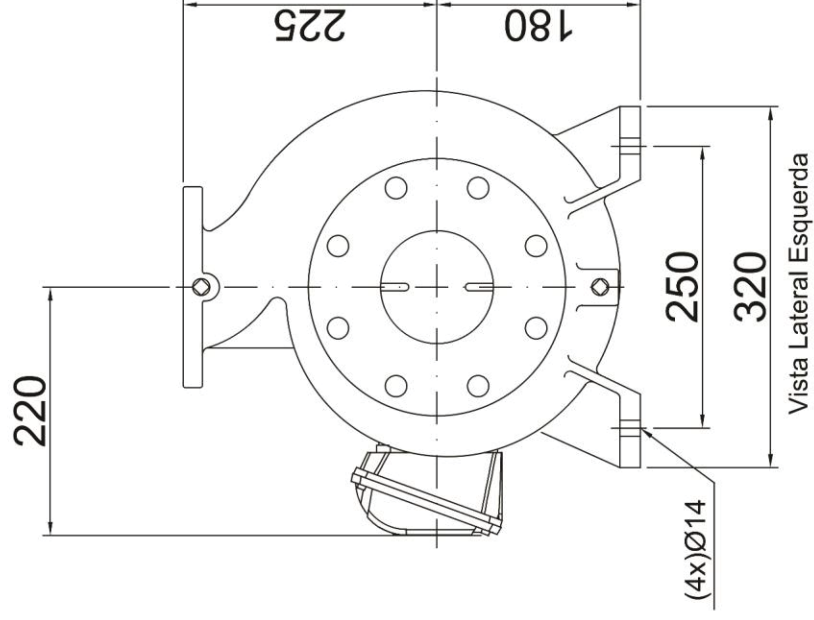
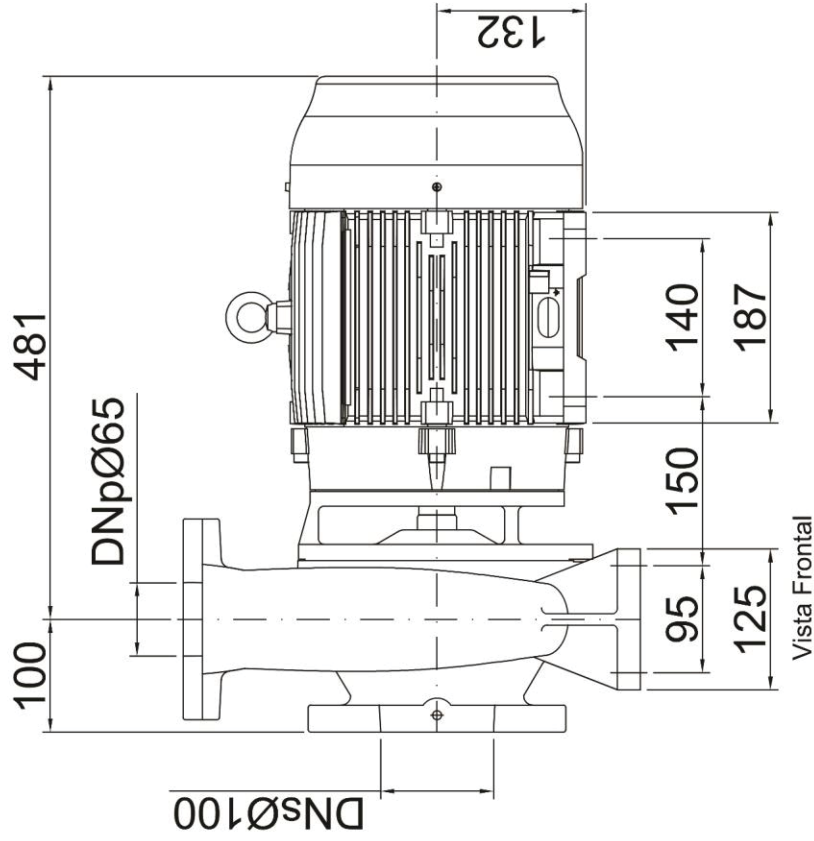
121 a 315
± 5,0


316 a 1000
± 7,5

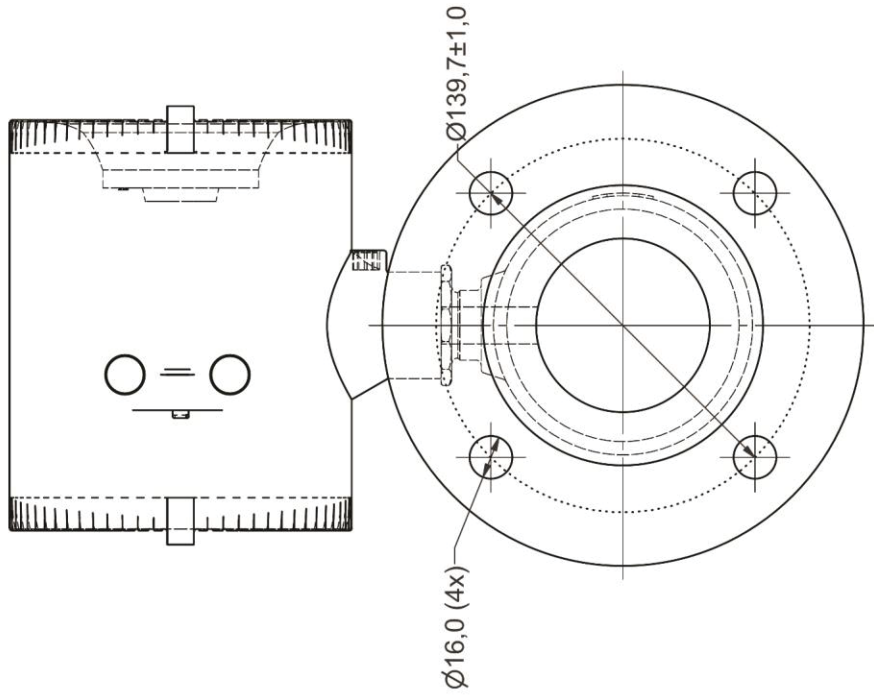
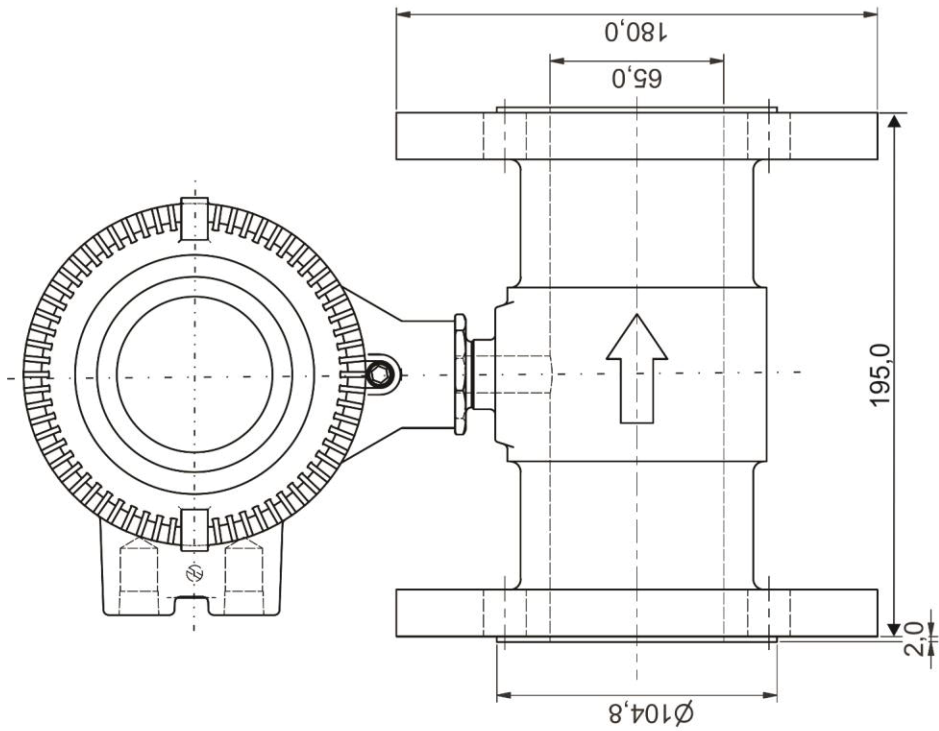
1001 a 2500
± 10,0


Folha N°.: 8

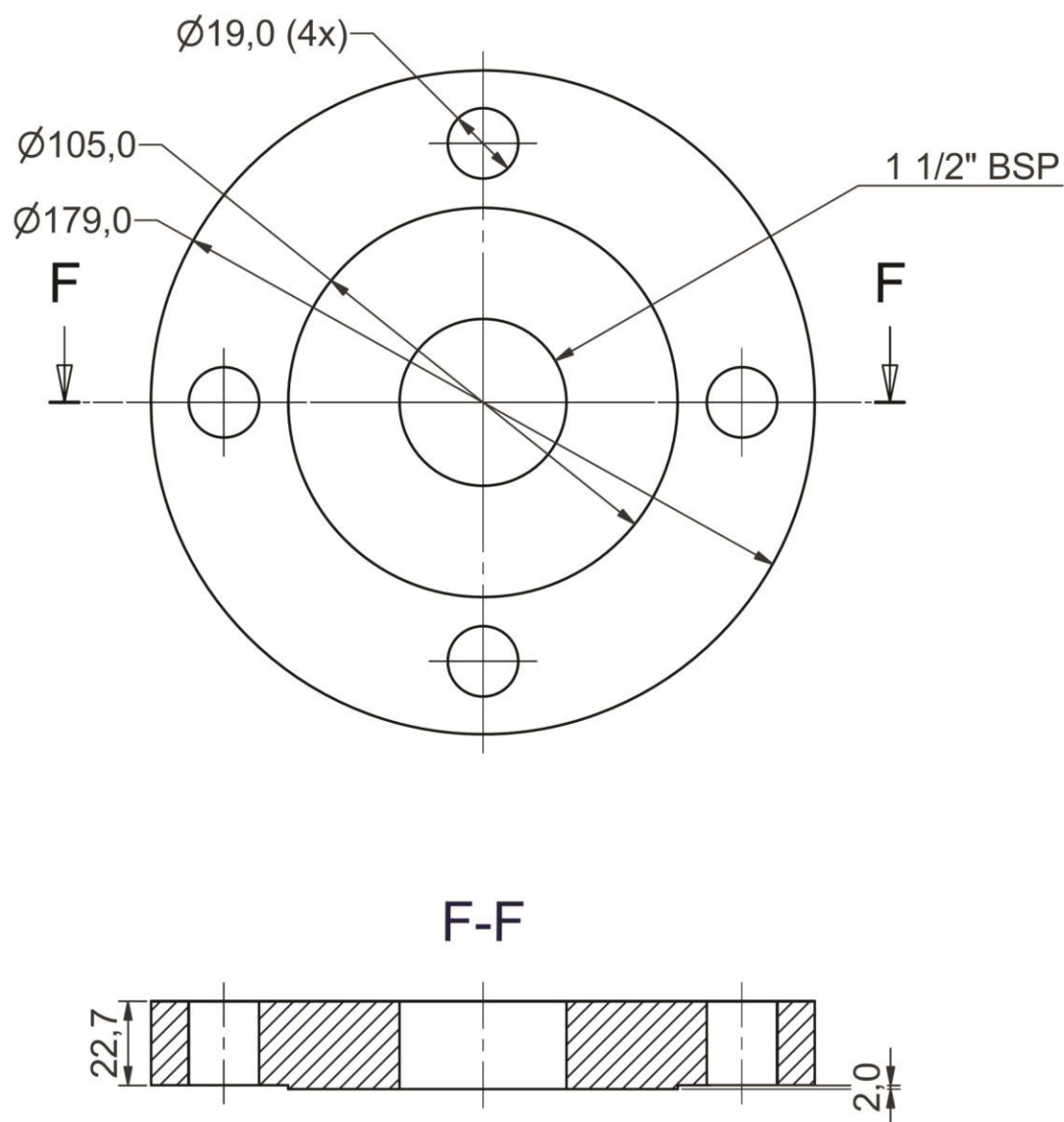
Tamanho: A4




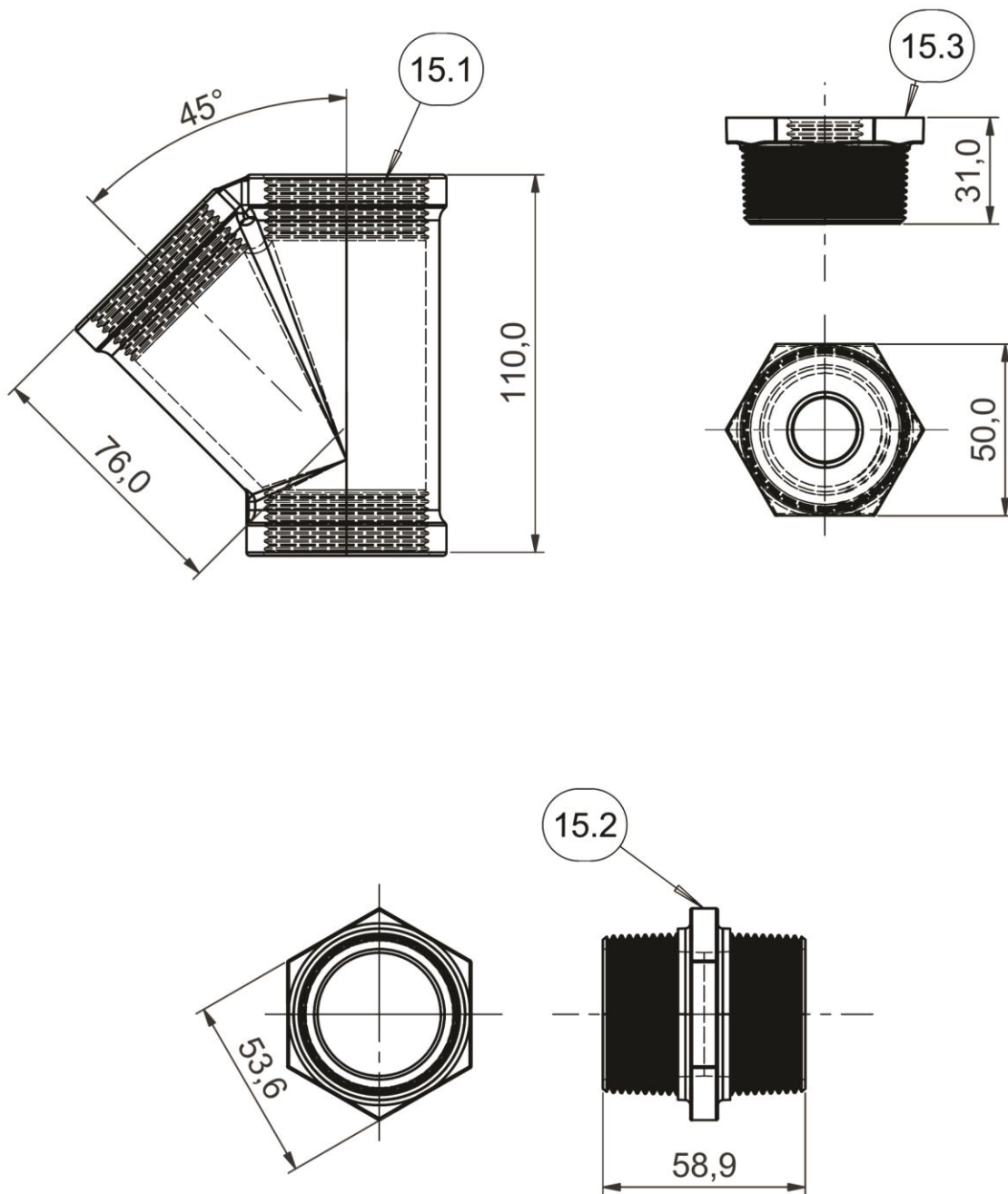
Projeto: Sistema Gerador de FAC					
Arquivo: 13 - Bomba INI B65200 H					
Desenho: Vagner Silverio		Data: 23/05/2019		Escala: 1:5	Unidade: mm
Respons.: Vagner Silverio		Data: 23/05/2019		Folha N.º: 9	
Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas					
1 a 6		7 a 30		31 a 120	
± 0,5		± 1,0		± 2,0	
121 a 315		316 a 1000		1001 a 2500	
± 7,5		± 10,0		± 10,0	
As informações contidas neste documento são de propriedade exclusiva do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.					
				Tamanho: A3	

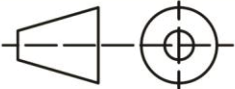


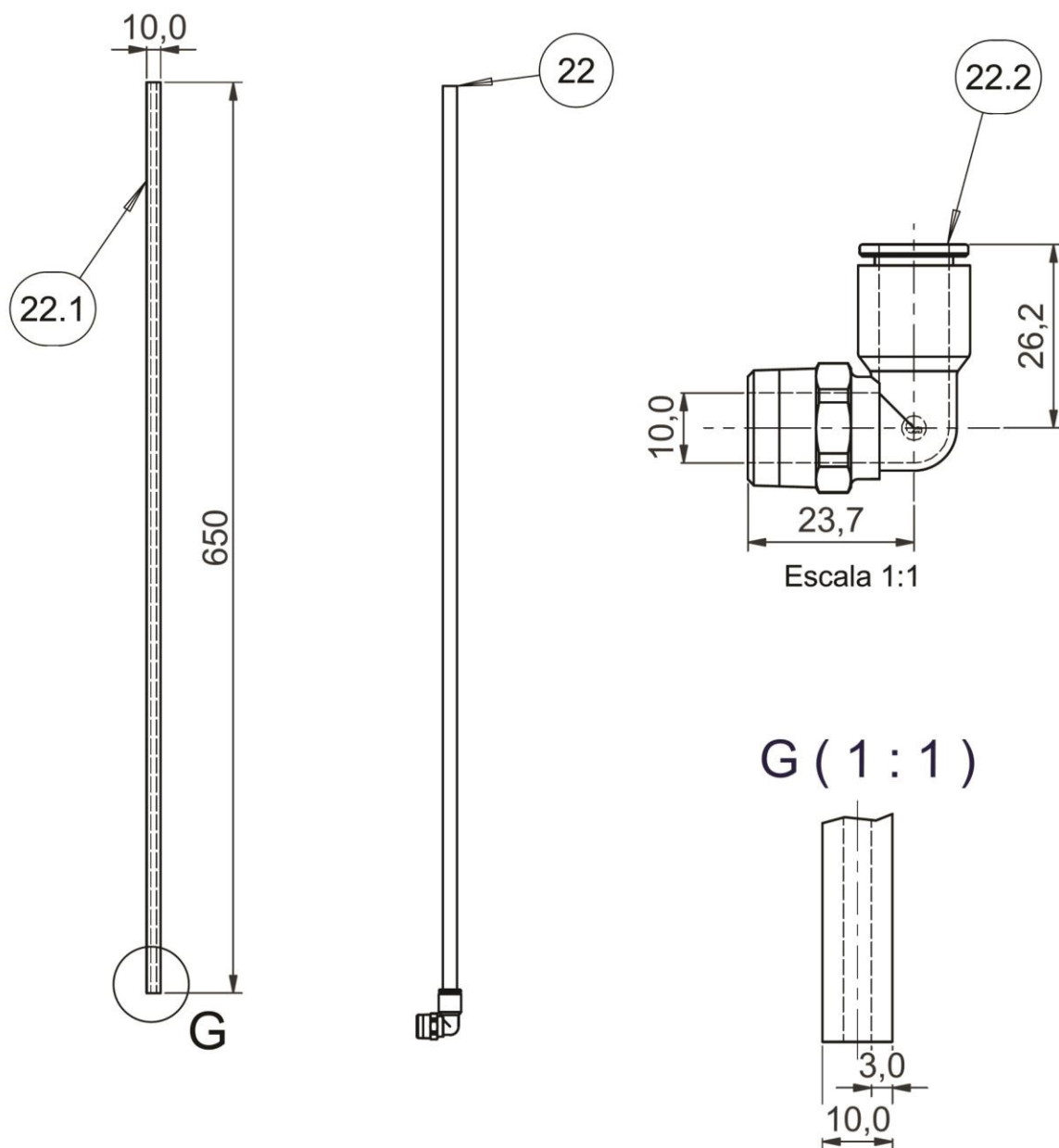
Projeto: Sistema Gerador de FAC					
Arquivo: 15 - Medidor de Vazão					
Desenho: Wagner Silverio		Data: 23/05/2019		Escala: 1:2	Unidade: mm
Respons.: Wagner Silverio		Data: 23/05/2019			
Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas					
1 a 6	7 a 30	31 a 120	121 a 315	316 a 1000	1001 a 2500
± 0,5	± 1,0	± 2,0	± 5,0	± 7,5	± 10,0
As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução total ou parcial, por qualquer meio, sem autorização por escrito.					
Folha N.º: 10				Tamanho: A3	



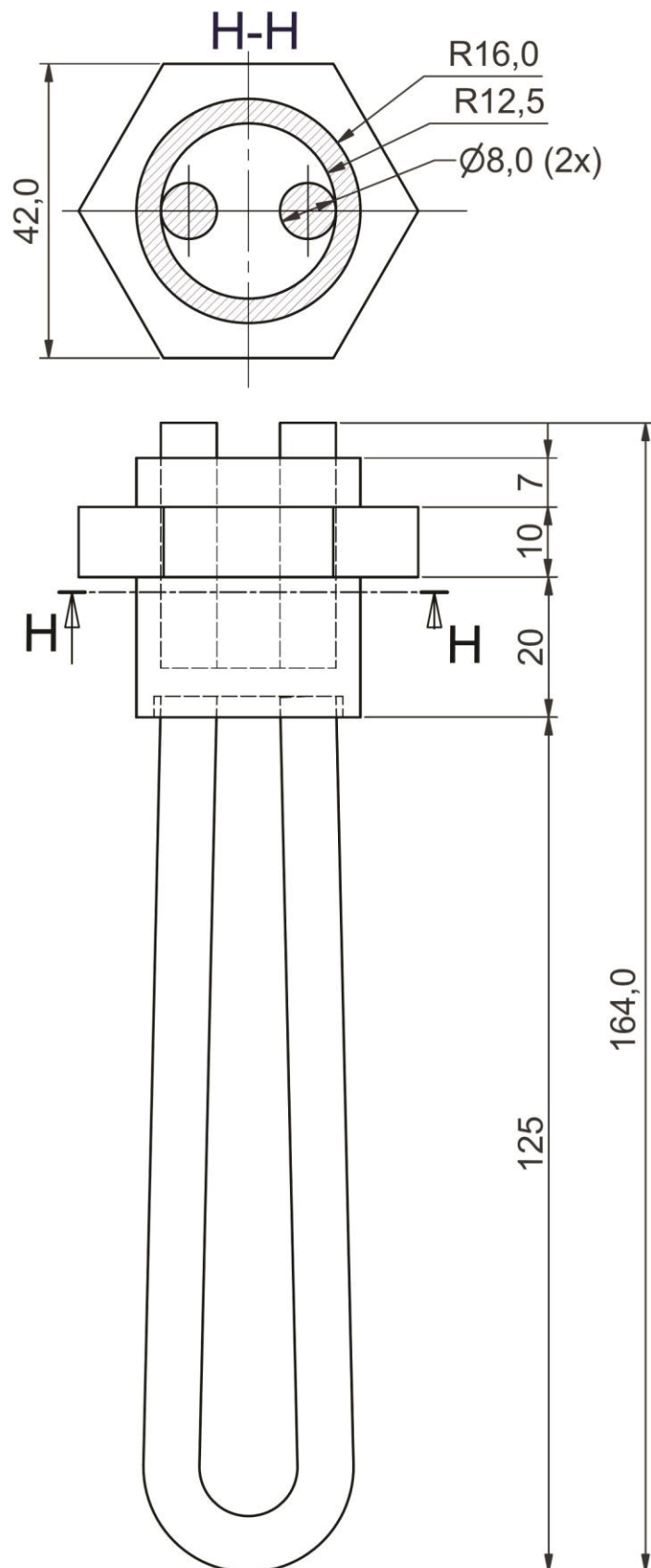
Projeto: Sistema Gerador de FAC								
Arquivo: 16 - Flange de Aço								
Desenho: Vagner Silverio				Data: 23/05/2019			Escala: 1:2	Unidade: mm
Respons.: Vagner Silverio				Data: 23/05/2019				
As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.	Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas						Folha N°.: 11	Tamanho: A4
	1 a 6	7 a 30	31 a 120	121 a 315	316 a 1000	1001 a 2500		
	± 0,5	± 1,0	± 2,0	± 5,0	± 7,5	± 10,0		



15.3	1	Bucha de Redução 1 1/2" - 1/2" BSP	AISI 1020			
15.2	1	Niple Duplo 1 1/2" BSP	AISI 1020			
15.1	1	Tee 45° 1 1/2" BSP	AISI 1020			
ITEM	QDE	NOME DO ARQUIVO	MATERIAL			
LISTA DE PEÇAS						
Projeto: Sistema Gerador de FAC						
Arquivo: 19 - Area de Inspeção						
Desenho: Vagner Silverio		Data: 23/05/2019	Escala: 1:2	Unidade: mm		
Respons.: Vagner Silverio		Data: 23/05/2019				
As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.		Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas			Folha N°.: 12	Tamanho: A4
		1 a 6 ± 0,5	7 a 30 ± 1,0	31 a 120 ± 2,0		



22.2	1	Conexão 90° 10mm - 1/2" BSP	---			
22.1	1	Tubo 10mm espessura 3mm	Acrílico			
ITEM	QDE	NOME DO ARQUIVO	MATERIAL			
LISTA DE PEÇAS						
Projeto: Sistema Gerador de FAC						
Arquivo: 22 - Visor de Nível						
Desenho: Vagner Silverio		Data: 23/05/2019	Escala:	Unidade:		
Respons.: Vagner Silverio		Data: 23/05/2019	1:5	mm		
As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.	Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas			Folha N°.: 13	Tamanho: A4	
	1 a 6	7 a 30	31 a 120	121 a 315	316 a 1000	1001 a 2500
	± 0,5	± 1,0	± 2,0	± 5,0	± 7,5	± 10,0



Projeto: **Sistema Gerdor de FAC**

Arquivo: 23 - Resistência Tubular

Desenho: Vagner Silverio

Data: 23/05/2019

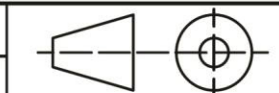
Respons.: Vagner Silverio

Data: 23/05/2019

As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.

Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas

1 a 6	7 a 30	31 a 120	121 a 315	316 a 1000	1001 a 2500
$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 5,0$	$\pm 7,5$	$\pm 10,0$



Escala:

Unidade:

1:1

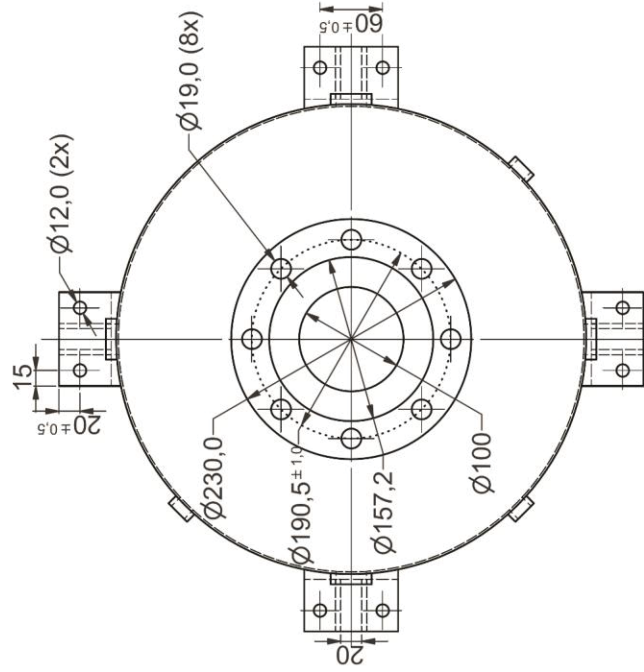
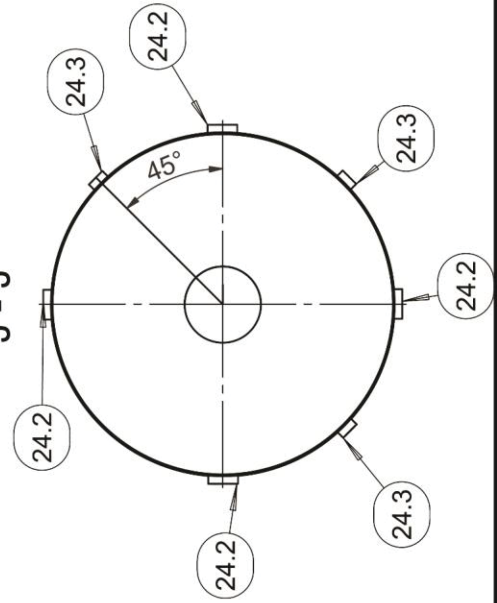
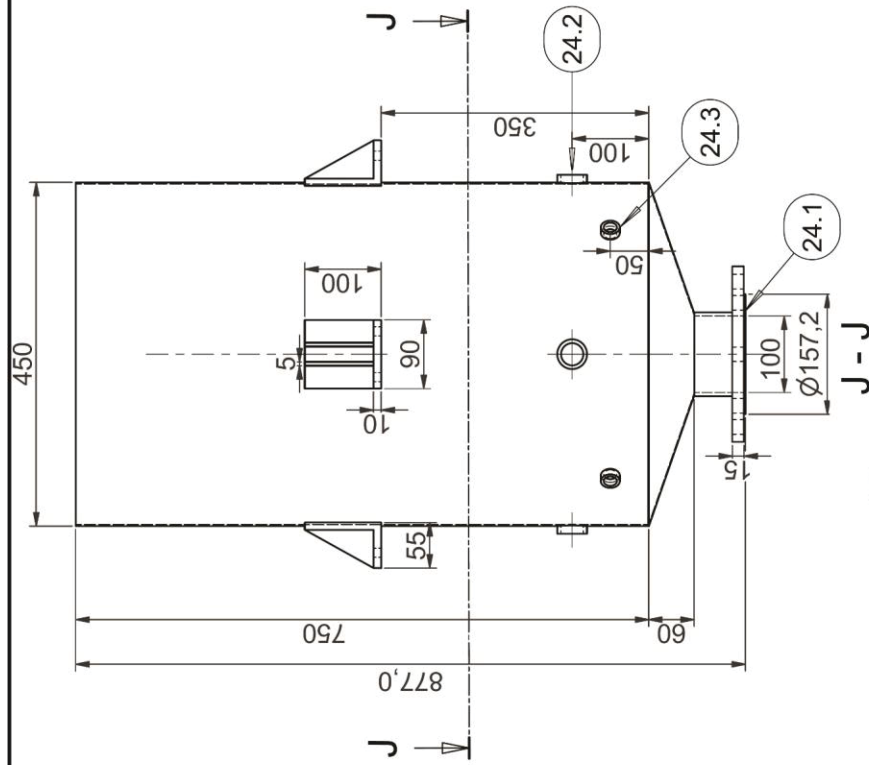
mm


Folha N°:

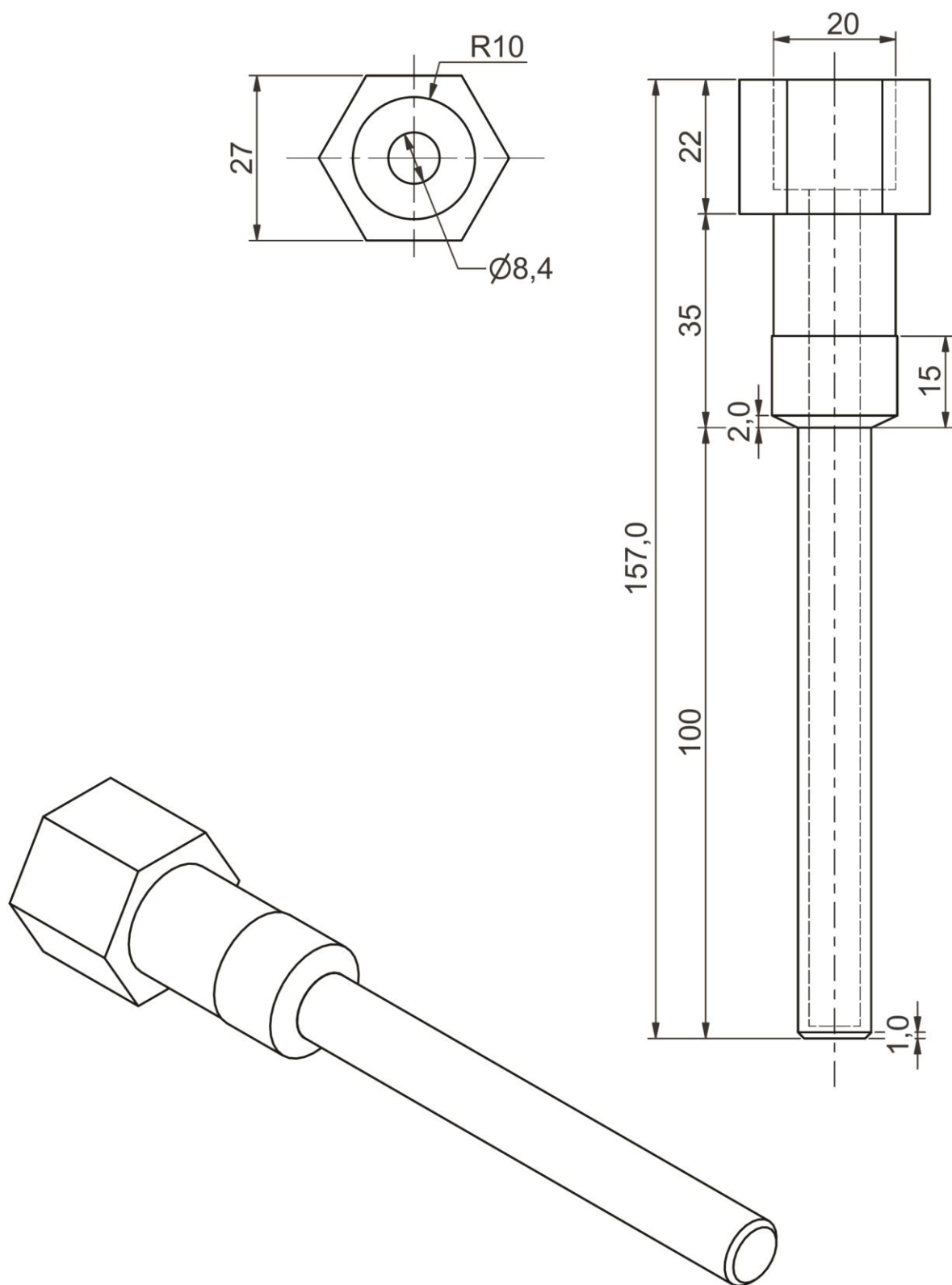
Tamanho:


14

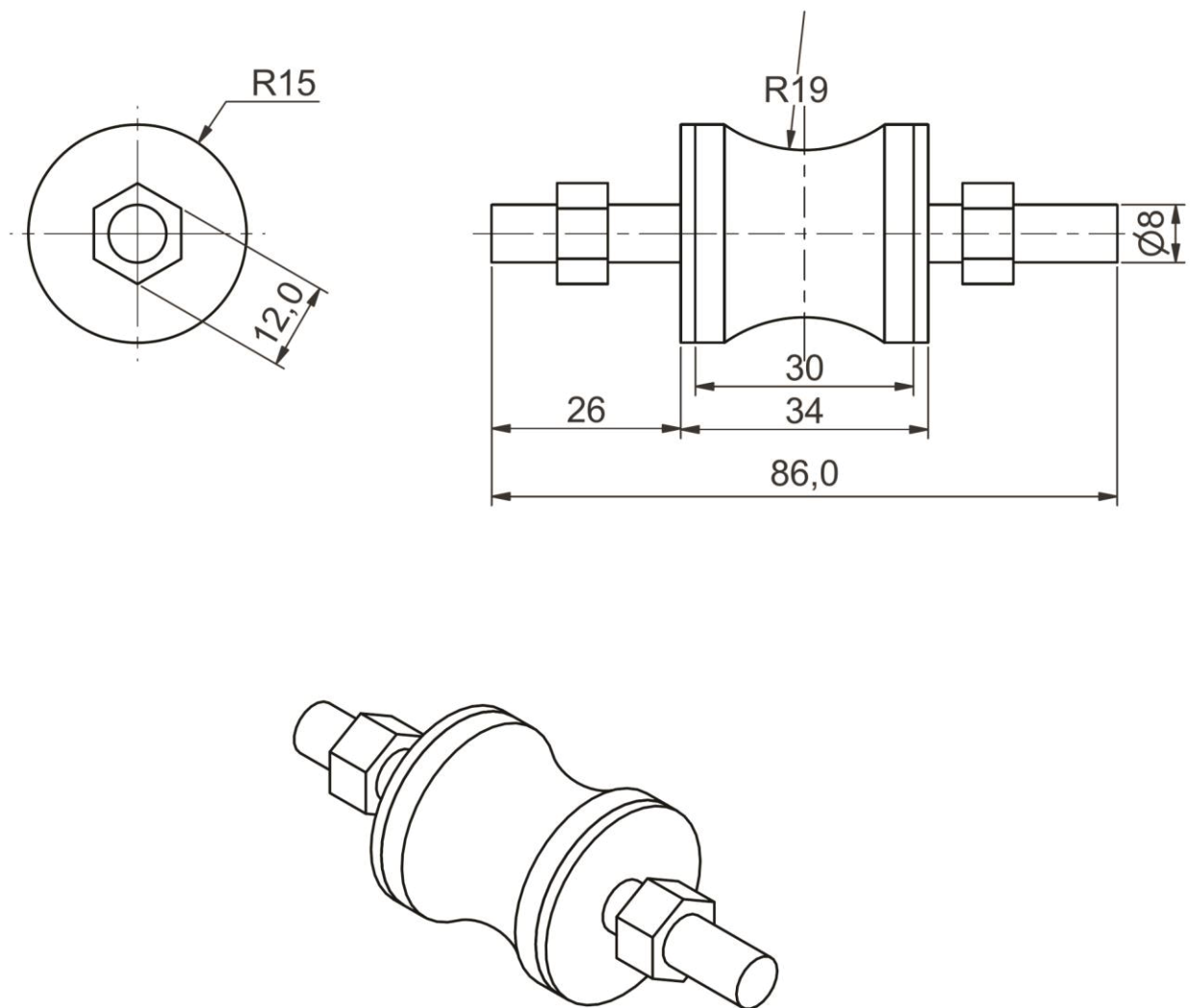
A4




24.3	3	Bocal	BSP 1/2"
24.2	4	Bocal	BSP 1"
24.1	1	Flange	ASME B16.5 DN 100 Classe 150
ITEM	QDE	NOME DO ARQUIVO	MATERIAL
LISTA DE PEÇAS			
Projeto: Sistema Gerador de FAC			
Arquivo: 24 - Reservatório 120L			
Desenho: Vagner Silverio		Data: 23/05/2019	
Respons.: Vagner Silverio		Data: 23/05/2019	Escala: 1:5 Unidade: mm
As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução total ou parcialmente por quaisquer meios sem autorização por escrito.			
Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas		Folha N.º:	Tamanho:
1 a 6	7 a 30	31 a 120	121 a 315
± 0,5	± 1,0	± 2,0	± 5,0
		316 a 1000	1001 a 2500
		± 7,5	± 10,0
		15	A3

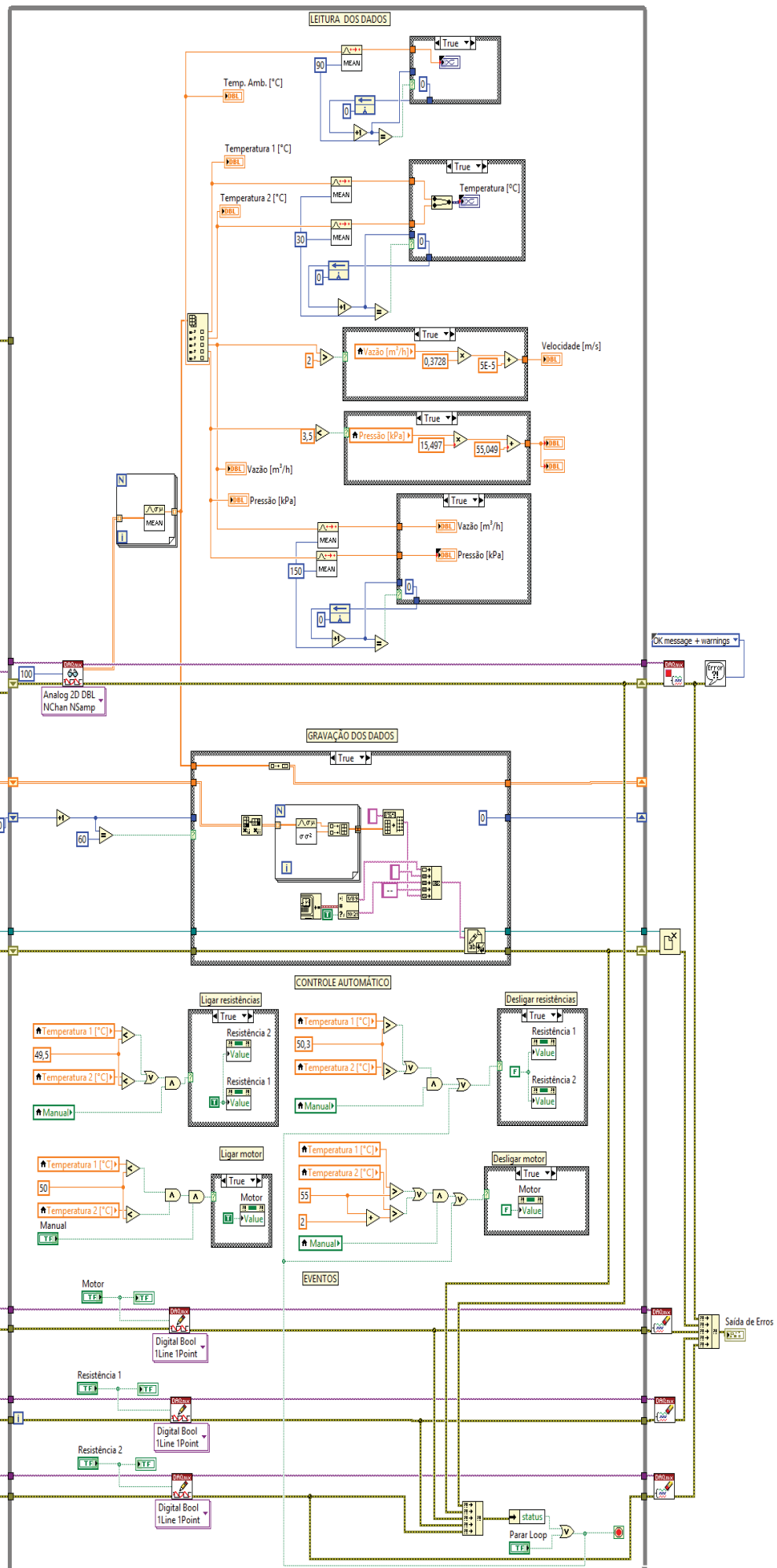
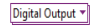
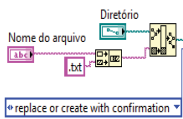
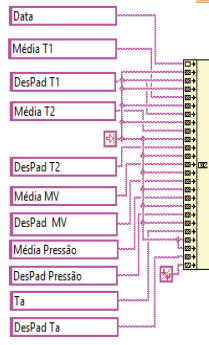
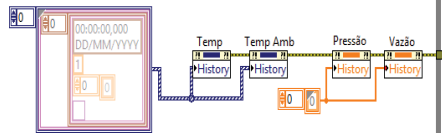


Projeto: Sistema Gerador de FAC								
Arquivo: 25 - Poço Termométrico								
Desenho: Vagner Silverio				Data: 23/05/2019			Escala: 1:1	Unidade: mm
Respons.: Vagner Silverio				Data: 23/05/2019				
As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.	Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas						Folha N°.: 16	Tamanho: A4
	1 a 6 ± 0,5	7 a 30 ± 1,0	31 a 120 ± 2,0	121 a 315 ± 5,0	316 a 1000 ± 7,5	1001 a 2500 ± 10,0		



Projeto: Sistema Gerador de FAC								
Arquivo: 26 - Coxim								
Desenho: Vagner Silverio				Data: 23/05/2019			Escala: 2:1	Unidade: mm
Respons.: Vagner Silverio				Data: 23/05/2019				
As informações contidas neste documento são de propriedade do Autor, sendo proibida a reprodução destas, parcial ou totalmente, por quaisquer meios sem autorização por escrito.	Desvios médios admissíveis para medidas sem tolerâncias indicadas						Folha N°.: 17	Tamanho: A4
	1 a 6	7 a 30	31 a 120	121 a 315	316 a 1000	1001 a 2500		
	± 0,5	± 1,0	± 2,0	± 5,0	± 7,5	± 10,0		

APÊNDICE D – DIAGRAMA DE BLOCOS *LABVIEW* AQUISIÇÃO - DADOS



ANEXOS

ANEXO A – DADOS BOMBA CENTRÍFUGA

Cliente: INSTITUTOS LACTEC

Modelo da Bomba: INI B 65200

Qtde Bomba: 1

Descrição do Projeto:

CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA BOMBA

Líquido	Outros
Temperatura	Norm.: 20°C / Máx.: 60
Peso Específico à T.O.	1.050,00 Kg/m³
Viscosidade à T.O.	1,00 Cp
Vazão Nominal	60,00 m³/h
Altura Manométrica Total	20,00 mca
Pressão de Sucção	0,00 mca
Pressão de Descarga	20,00 mca
Pressão de Diferencial	20,00 mca
NPSH Requerido / Disponível	2,54 m / NI
Rotação Nominal	1.750 rpm
Rendimento	76,37 %
Potência Consumida	6,04 cv
AMT de SHUT-OFF	22,16 mca
Vazão Mínima Contínua Estável	31,94 m³/h
Potência Máxima (Rotor Projeto)	7,44 cv
Vazão no Ponto de Melhor Eficiência	64,19 m³/h
Vazão Nominal / Vazão do BEP	93,47 %

DADOS CONSTRUTIVOS

Bocais	DN	Norma	Classe	Face	Posição	
Sucção	mm	ASME B 16.5	150	RF	Horizontal	
Descarga	mm	ASME B 16.5	150	RF	Vertical	
Tipo				Horizontal		
Número de Estágios				1		
Carcaça	Bipartida		Radialmente			
	Voluta		Simples			
	Montagem		Pés			
Rotor	Tipo		Fechado			
	Entrada		Simples			
	Montagem		Em Balanço			
	Fluxo		Radial			
Diâmetro (mm)				Máx	Min	Proj
				219	180	208
Mancais Rolamentos Lubrificação				Nao se Aplica		
Vedação				Selo Mecânico		
Resfriam.				Caixa de Selagem		
Conexões				Dreno		
Rosca				NPT		
Sent Rotação-Visto lado acionam.				Horário		
Pintura				Padrão Imbil		

ACESSÓRIOS

Base	Tipo	Viga-U Estrutural
Chumbador	Nao se Aplica	

Acoplamento	Fabricante	
	Modelo/Tamanho	
Espaçador	Sem Espaçador	

Motor Elétrico	Fabricante	WEG
	Tipo	W22 PLUS
	Potência	7,50 cv
	Rotação	1.740 rpm
	Proteção	IP55
	Carcaça	112M
	Tensão	220/380/440 V
	Frequência	60 HZ
	F.S.	1,15
	Isolação	F

MATERIAIS CONSTRUTIVOS

Descrição	Material
Carcaça	A351 CF8M
Tampa de Pressao/Sucção	A351 CF8M
Rotor	A351 CF8M
Anel de Desgaste	A351 CF8M
Bucha Protetora	AISI 316
Lanterna / Peça Junção	A48 CL30

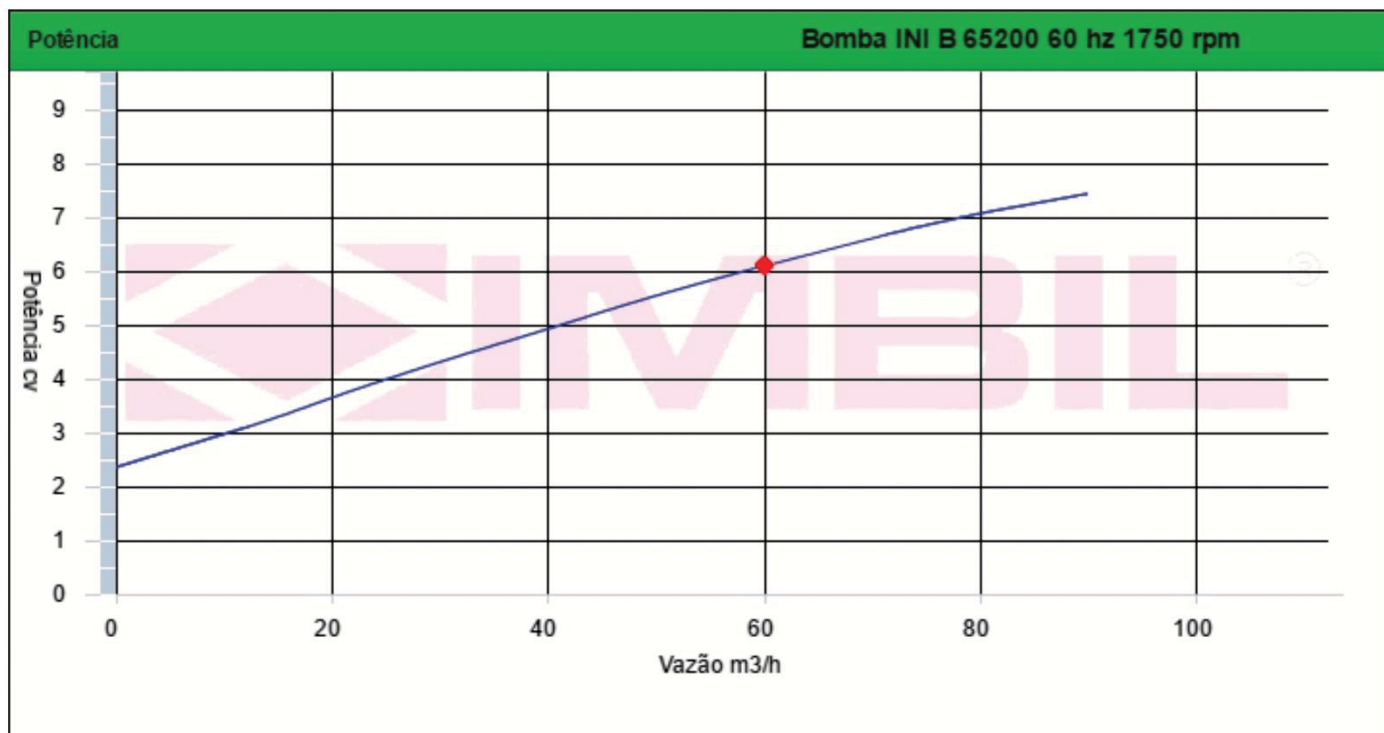
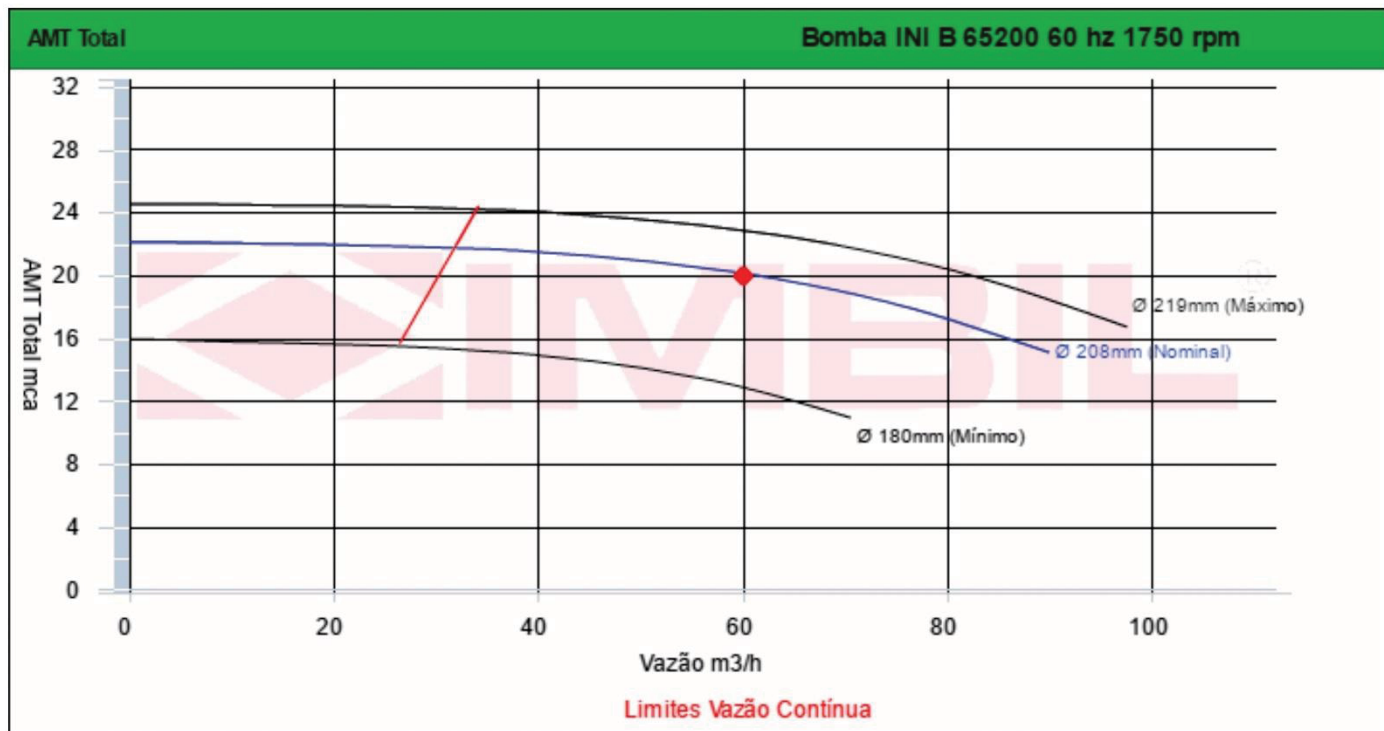
TESTES

PLANO DE CONTROLE DE QUALIDADE E TESTES

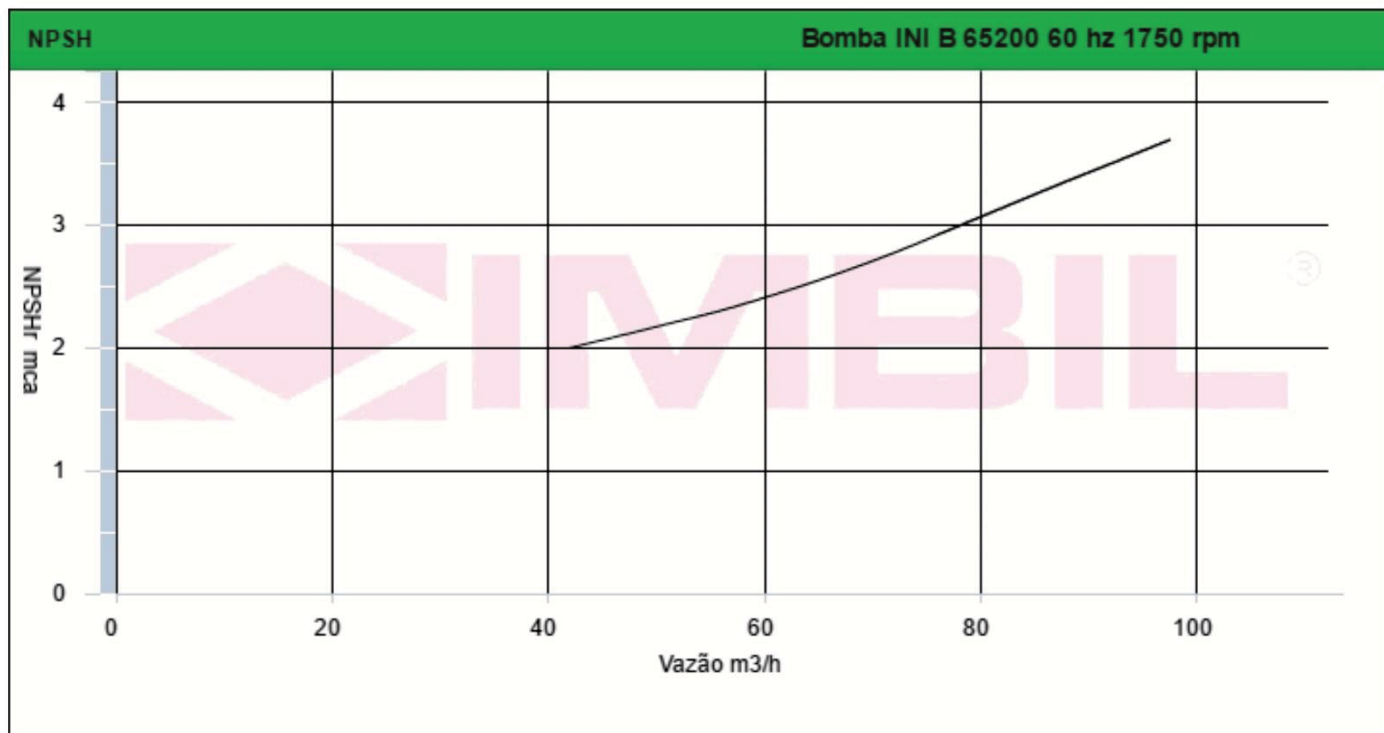
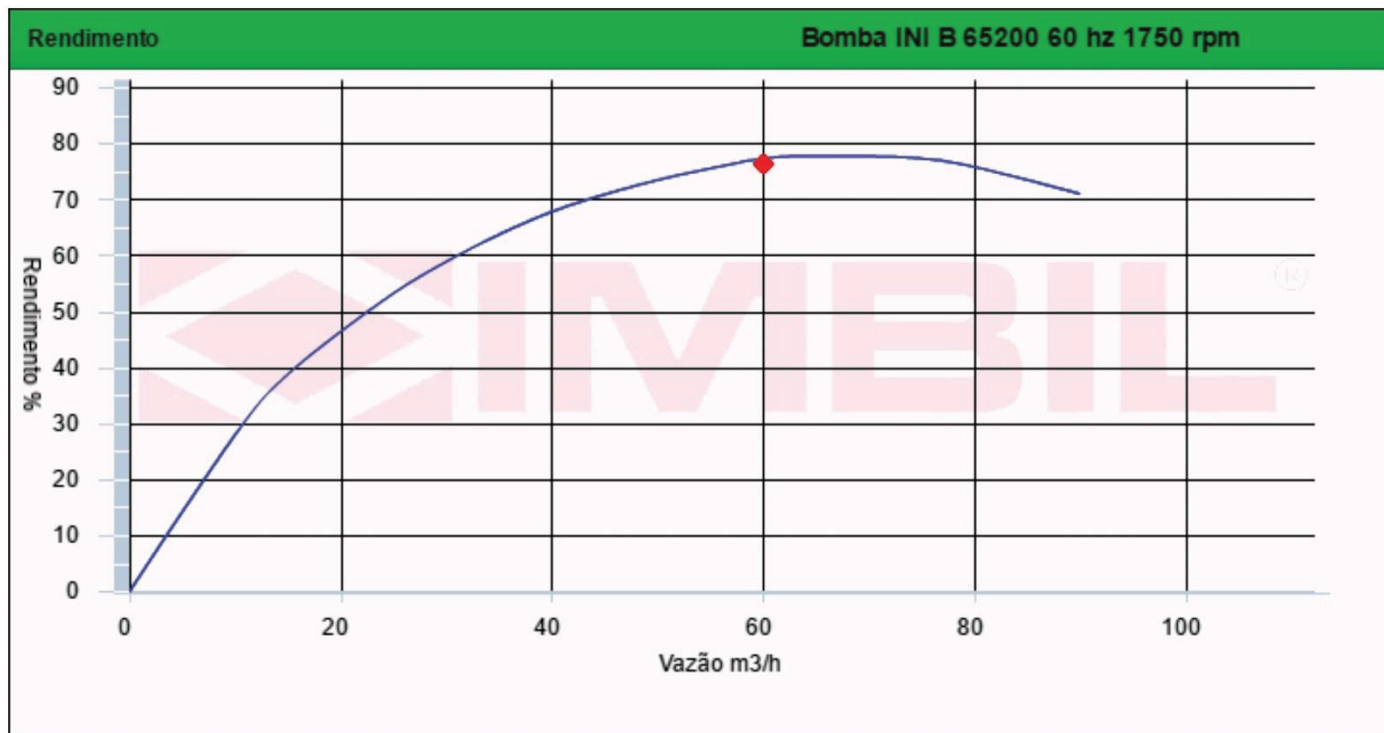
Teste de Performance: Teste será realizado conforme Norma HI (Hydraulic Institute)					
O conjunto girante completo dinamicamente balanceado com qualidade G 6,3 (mínimo).					
Teste Hidrostático	Sim				
Teste de Performance	Não				
Teste de NPSH	Não				
Teste de Vibração	Não				
Teste de Pintura	Não				
Teste de Ruído	Não				
Análise de Material	Não				

Observação: Fluido : Água com areia até 5%. pH até 4.

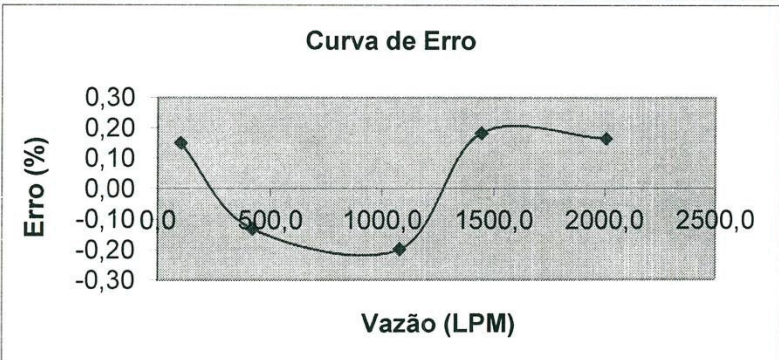
Curva: Anexo 1



Curva: Anexo 1



ANEXO B – CERTIFICADO CALIBRAÇÃO MEDIDOR DE VAZÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° 1709000174		P.V.: A10501																																
CLIENTE:	INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO																																	
1. IDENTIFICAÇÃO DO MEDIDOR																																		
SENSOR	ELETROMAGNÉTICO																																	
FABRICANTE	CONTECH																																	
N. SÉRIE	1709000174																																	
MODELO	CTHHD 2.1/2																																	
2. CONDIÇÕES DE AFERIÇÃO																																		
FLUÍDO DE AFERIÇÃO: ÁGUA TEMPERATURA MÉDIA DO FLUÍDO: 22°C MASSA ESPECÍFICA MÉDIA DO FLUÍDO: 0,996 Kg/cm³ PROCEDIMENTO DE ENSAIO BASEADO NO MÉTODO DE PESAGEM																																		
3. PADRÃO DE REFERÊNCIA																																		
Padrão: Balança eletrônica com 3 células de carga Fabricante: Alpha Identificação: 13777 Faixa Nominal: 1000Kg Valor de uma divisão: 0,1Kg Certificado N° 280500 - Data: 16/03/2017 - RBC N° Calibração: 0222																																		
4. RESULTADOS																																		
<table border="1"><thead><tr><th>V.I.I.T. (LPM)</th><th>V.I.I.P. (LPM)</th><th>Erro (%)</th><th>Vazão(m³/h)</th><th>SAIDA 4 a 20mA</th></tr></thead><tbody><tr><td>2001,2</td><td>2004,5</td><td>0,16</td><td>120,1</td><td>4,0 mA= 0,0 m³/h</td></tr><tr><td>1440,9</td><td>1443,5</td><td>0,18</td><td>86,5</td><td>20,0 mA= 100 m³/h</td></tr><tr><td>1080,6</td><td>1078,5</td><td>-0,20</td><td>64,8</td><td></td></tr><tr><td>420,3</td><td>419,7</td><td>-0,13</td><td>25,2</td><td></td></tr><tr><td>99,5</td><td>99,7</td><td>0,15</td><td>6,0</td><td></td></tr></tbody></table>					V.I.I.T. (LPM)	V.I.I.P. (LPM)	Erro (%)	Vazão(m³/h)	SAIDA 4 a 20mA	2001,2	2004,5	0,16	120,1	4,0 mA= 0,0 m³/h	1440,9	1443,5	0,18	86,5	20,0 mA= 100 m³/h	1080,6	1078,5	-0,20	64,8		420,3	419,7	-0,13	25,2		99,5	99,7	0,15	6,0	
V.I.I.T. (LPM)	V.I.I.P. (LPM)	Erro (%)	Vazão(m³/h)	SAIDA 4 a 20mA																														
2001,2	2004,5	0,16	120,1	4,0 mA= 0,0 m³/h																														
1440,9	1443,5	0,18	86,5	20,0 mA= 100 m³/h																														
1080,6	1078,5	-0,20	64,8																															
420,3	419,7	-0,13	25,2																															
99,5	99,7	0,15	6,0																															
V.I.I.P = Valor Indicado pelo Instrumento Padrão V.I.I.T. = Valor Indicado pelo Instrumento de Trabalho Incerteza dos Resultados = +/-0,1 %																																		
5. GRÁFICO																																		
 <p>Curva de Erro</p> <p>Erro (%)</p> <p>Vazão (LPM)</p>			<p>Responsável:</p> <p><i>Marcio Alves</i></p> <p>Marcio Alves Departamento Técnico</p> <p>Data: 23/11/2017</p>																															

ANEXO C – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO MANÔMETRO

Certificado de Calibração Famabras nº T1-36707/ 2017

F11/1

Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE de acordo com a
ABNT NBR ISO / IEC 17025, sob o Nº CAL 0376

Solicitação

Cliente: Instituto de Tecnologia para desenvolvimento - Lactec
Endereço: Rodovia BR-116 - S/N km 98 - Jardim das Americas - Curitiba - PR
Solicitante: Salcas Industria E Comercio Ltda
Endereço: Rua Marilandia, 265 - Vila Primavera - Sao Paulo - SP

Descrição do instrumento

Instrumento: Manômetro de Teste
Fabricante: Salcas Industria e Comércio Ltda
Modelo: Não Consta
Faixa de Indicação: 0/350 psi x 0/25 kgf/cm²
Faixa Calibrada: 0/25 kgf/cm²

Número de Identificação: Não Consta
Número de Série: 806089

Valor de Uma Divisão: 0,1 kgf/cm²

Padrão utilizado

Balança de Pressão
PM-02 com incerteza de $\pm 0,01\%$ conforme certificado nº BAL 1038/16
Próxima calibração do padrão utilizado: 25/08/2019
O padrão foi calibrado pelo laboratório de pressão ABSi, laboratório acreditado pela CGCRE sob nº CAL 0056.

Procedimento

A calibração foi realizada com o instrumento na sua posição de utilização a uma temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, umidade relativa de $50\% \pm 20\%$ e aceleração da gravidade local de $9,7863171\text{m/s}^2$. O instrumento permaneceu sobre pressão máxima de aproximadamente 1 minuto para estabilização do sistema de calibração conforme nosso procedimento de calibração: ROF-21(Ed.2 rev.5).

Incerteza da medição

- 1) A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2$, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- 2) O resultado apresentado em (%) declarado em cada ponto é calculado em função do valor do fundo de escala do instrumento em teste.
- 3) A validade de calibração do instrumento deve ser estabelecida pelo usuário em um plano de calibração descrito no sistema da qualidade de acordo com a norma NBR ISO 10.012.
- 4) O instrumento foi calibrado sem preenchimento interno.

Resultados apresentados pelo instrumento

Pressão Indicada Unidades		Leitura no padrão de referência				Desvio		Incerteza	
		Primeiro Ciclo		Segundo Ciclo					
SI	Instrumento	Carrego	Descarrego	Carrego	Descarrego				
MPa	kgf/cm²	kgf/cm²	kgf/cm²	kgf/cm²	kgf/cm²	kgf/cm²	%	kgf/cm²	%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1961	2	2,00	2,00	1,99	1,99	0,01	0,04	0,05	0,18
0,3923	4	4,01	4,01	4,01	4,01	-0,01	0,04	0,04	0,18
0,5884	6	6,01	6,01	6,01	6,01	-0,01	0,04	0,04	0,18
0,7845	8	8,01	8,00	8,01	8,00	-0,01	0,04	0,05	0,18
0,9807	10	10,01	10,01	10,01	10,01	-0,01	0,04	0,04	0,18
1,2749	13	13,01	13,01	13,01	13,01	-0,01	0,04	0,04	0,18
1,5691	16	16,01	16,01	16,01	16,00	-0,01	0,04	0,05	0,18
1,8633	19	19,01	19,01	19,01	19,01	-0,01	0,04	0,04	0,18
2,1575	22	22,00	22,00	22,00	22,00	0,00	0,00	0,04	0,18
2,4517	25	25,01	25,01	25,01	25,01	-0,01	0,04	0,04	0,18

Obs.: 1 MPa = 10,19716 kgf/cm²

Características metrológicas apresentadas pelo instrumento em relação a amplitude da faixa de indicação (%)

Erro Fiducial:	0,04 %	Repetibilidade:	0,04 %
Incerteza:	0,18 %	Histerese:	0,04 %

Pedido de serviço: OM-23484501 - LOTE 429941

Calibrado em: 26/09/2017

Emitido em: 26/09/2017

Marcos D. Camargo
Técnico do Laboratório
Signatário Avaliado

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medidas. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica.

Os resultados apresentados no presente documento tem significação restrita e se aplicam somente ao instrumento calibrado. A Utilização dos mesmos para fins promocionais depende da prévia autorização da **FAMABRAS**. A reprodução do documento para outros fins só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO MEDIDOR PH/ORP/TEMPERATURA

CALIBRATION CERTIFICATE

Model Number: H-991002
Serial Number: G0049052

Hanna Instruments certifies that this instrument has been calibrated in accordance with applicable Hanna procedures during the manufacturing process.

These procedures are designed to assure that the meter will meet its declared specification.

Results are listed on the reverse, and satisfy the standards of this company.

CALIBRATION POINTS: 7.01 pH 4.01 pH

OPERATOR: A.B.

QC INSPECTION

APPEARANCE



FUNCTIONING



DISPLAY



TESTING POINT/S: 10.01 pH 240 mV 21°C

READING/S: 10.00 pH 235 mV 23.8°C


INSPECTOR: CM LOT NR: 17835

Ambient testing conditions: Temperature: 13...30°C Humidity: 40...75 RH

ANEXO E – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO BOROSCÓPIO

Certificate of Calibration

Customer Name: Address:	
Customer PO NO. or GEIT Sales Order NO.:	924295

Calibrated by: Pamela Mayberry		GE Inspection Technologies 721 Visions Drive Skaneateles, NY 13152 T 315-554-2000
-----------------------------------	---	---

WO No. 20985335	GE Inspection Technologies	Calibrated: 8/25/2017 Next Calibration: 8/25/2023
--------------------	-------------------------------	--

Calibrated Item

Part Number	Part Description	Serial Number
VER2600D	VERIFICATION SYSTEM, 6.1MM	17358050

Actual Measurement:	Side/Fwd	0.100 INCH (Inches/mm)	0.09998 / 2.53949	
	Target	1.0 MM (Inches/mm)	0.03923 / 0.99644	
# of Targets	N/A	0.100 INCH (Inches/mm)	N/A / N/A	
		1.0 MM (Inches/mm)	N/A / N/A	

Comments:	Temp.	74.5 dg. F.
	Temp.	23.6 dg. C.
	Relative Humidity:	41.0 %
Procedure No.:	P04102	

Standards Used

Asset No.	Model No.	Manufacturer	Description	Last Cal.	Due Cal.	Uncertainty
WT-8950-01	MVP300	OGP	SmartScope	9/19/2016	9/19/2017	XY = 48 µin Z = 50 µin

GE Inspection Technologies certifies that this equipment has been calibrated with standards traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST). Documentation of traceability to the NIST is on file at GE Inspection Technologies and available for audit upon request. This Certificate of Calibration shall not be reproduced, except in full.

Certified by: (handwritten only):

Pamela Mayberry 8/25/17